

Observation de données et supervision : du capteur physique à la décision numérique

Benoît Larroque

12 septembre 2025

Table des matières

I	Activités de recherche doctorales	11
1	Introduction	13
2	Activité de recherche doctorale	15
2.1	Contexte	15
2.2	Problématique scientifique	16
2.3	Déroulement	16
2.4	Résumé de la thèse	16
2.4.1	DLF	16
2.4.2	Principe d'un observateur	17
2.4.3	Observateur de fonctionnelle linéaire	18
2.4.4	Observateurs à entrées inconnues	18
2.4.5	Génération de résidus structurés	19
2.4.6	Ouverture vers les SLNS	19
2.5	Publications	20
	Références personnelles	21
	Références	21
II	Activités de recherche postdoctorales	23
3	Laboratoires distants - Remote lab	27
3.1	Introduction	27
3.2	Problématiques et exigences	28
3.3	État de l'art	29
3.4	Un prototype opérationnel - 2009/2014	30
3.5	Impact sur la motivation des étudiants	34
3.6	Plateforme Laborem depuis 2017	36
3.6.1	Contexte	36
3.6.2	Description du matériel	38
3.6.3	Partie logicielle	40
3.7	Synthèse	40
	Références personnelles	42
	Références	43

4	Traitement d'images	47
4.1	Introduction	47
4.2	Vision par drone dans un laboratoire distant	48
4.2.1	Contexte	48
4.2.2	Choix de développement	48
4.2.3	Contrôle du quadricoptère	49
4.2.4	Estimation de la pose Objet-Caméra	50
4.2.5	Approche proposée	51
4.2.6	Réglage des paramètres	52
4.2.7	Estimation de la pose visage-caméra	52
4.2.8	Scénario type	56
4.2.9	Scénario de suivi de visage	58
4.2.10	Conclusion	58
4.3	Suivi de civelles	60
4.3.1	Contexte	60
4.3.2	Le dispositif expérimental	60
4.3.3	Description de l'algorithme de traitement des vidéos	62
4.3.4	Synthèse des résultats	65
4.3.5	Conclusion	66
	Références personnelles	68
	Références	68
5	Observation et traitement de signal	71
5.1	Système temps réel de mesures de pression d'impact de vagues	71
5.1.1	Contexte	71
5.1.2	Site expérimental	72
5.1.3	Prétraitement des signaux	77
5.1.4	Détection automatique des impacts	78
5.2	Caractérisation des signaux d'impact de vagues	78
5.2.1	Critères temporels	78
5.2.2	Critères de pression	79
5.2.3	Bases de données	80
5.3	Caractérisation et classification des signaux	81
5.3.1	Prévision de la pression d'impact des vagues	83
5.3.2	Clustering des types d'impacts des vagues	84
5.3.3	Travaux connexes	90
5.4	Traitement de signaux d'accélérométrie pour l'étude comportementale de poissons	92
5.4.1	Objectif	92
5.4.2	Les biologgers	92
5.4.3	Les huit étapes de traitement de l'application	93
5.4.4	Résultats	95
5.5	Perspectives	95
	Références personnelles	97
	Références	97
6	Supervision logicielle	99
6.1	Introduction	100
6.2	Supervision logicielle et instrumentation	100
6.2.1	Systèmes physiques, télémessure, télécontrôle et automatisation	100

6.2.2	Stockage des données et interopérabilité	101
6.2.3	Accès distant et défis sécuritaires	101
6.2.4	Données et logiciels FAIR	101
6.2.5	Catégories de logiciels	102
6.2.6	Interopérabilité	103
6.2.7	FAIR et Supervision	103
6.2.8	Différentes interopérabilités	104
6.2.9	Choix d'un système de supervision	104
6.3	Logiciel PyScada	106
6.3.1	Présentation	106
6.3.2	Abstractions	106
6.3.3	Présentation de PyScada	106
6.3.4	Django	107
6.3.5	Cœur de PyScada	108
6.3.6	Couche d'abstraction matérielle	109
6.3.7	Interfaces web	110
6.3.8	Synthèse	111
6.4	Exemples d'application	112
6.4.1	Laborem	113
6.4.2	Supervision d'ouvrages du littoral	114
6.4.3	Digue de l'Artha	114
6.4.4	Réseau Sirena	116
6.4.5	Suivi énergétique du bâtiment	117
6.5	Conclusion	119
	Références personnelles	120
	Références	120
7	Projet de recherche	123
7.1	Contexte	123
7.2	Instrumentation pour le génie côtier	124
7.2.1	WIP	124
7.2.2	Station de mesure de la digue de l'Artha	127
7.2.3	Canal de rupture de barrage	128
7.3	Instrumentation pour le suivi énergétique de bâtiment	129
7.4	Traitement d'image / Photogrammétrie	129
7.4.1	Suivi des blocs de protection d'ouvrages de défense côtiers	129
7.4.2	Différenciation de nuages de points	129
7.4.3	Comparaison d'orthophotographies	131
7.4.4	Modélisation des blocs et suivi de déplacement	131
7.5	Traitement de signal / Intelligence artificielle	132
7.5.1	Prédiction des pressions d'impact des vagues	132
7.5.2	Efficacité énergétique dans le bâtiment	132
7.5.3	Techniques d'IA pour le suivi et l'optimisation des consommations énergétiques dans le bâtiment	133
7.6	Supervision logicielle	134
	Références personnelles	135
	Références	135
8	Conclusion générale	137

III	Autres activités académiques et scientifiques	139
9	Curriculum vitae	141
10	Encadrement et co-encadrement d'étudiants	145
10.1	Résumé	145
10.2	Co-Direction et co-encadrement de thèse	146
10.3	Liste des directions et codirections de thèses	146
11	Tâches administratives, activités d'enseignement, expérience en entreprise	149
11.1	Tâches administratives, responsabilités collectives et d'intérêt général	149
11.1.1	Présentation synthétique des responsabilités	149
11.1.2	Responsabilités et mandats locaux	149
11.1.3	Autres	151
11.2	Activités d'enseignement et responsabilités pédagogiques	151
11.2.1	Investissement pédagogique	151
11.2.2	Responsabilités pédagogiques	155
11.3	Prestation / collaboration recherche & développement (R & D)	156
12	Publications	159
12.1	Articles dans revues internationales à comité de lecture (13)	159
12.2	Actes publiés de conférences internationales, congrès et colloques à comité de lecture (17)	160
12.3	Articles dans conférences nationales (13)	162

Remerciements

Je souhaite exprimer ma profonde gratitude à toutes celles et ceux qui m'ont accompagné et soutenu tout au long de mon parcours de recherche.

Je remercie tout particulièrement les doctorants que j'ai eu l'honneur d'encadrer : Fawzi Khattar, Nawal Eldrogi, Dorian D'Amico, Pierre-Antoine Poncet et Camille Lavayssière, dont l'engagement, le sérieux et la curiosité scientifique ont largement enrichi mes réflexions et mes travaux. J'adresse également mes remerciements aux étudiants de Master que j'ai eu la chance d'accompagner, Frédéric Bertin et Amira Rahali, pour la qualité de leurs contributions et leur enthousiasme dans la recherche.

Je tiens à remercier l'ensemble des membres du laboratoire SIAME pour leur soutien, leurs échanges et l'environnement de recherche stimulant qu'ils m'ont offert. J'adresse une mention toute particulière à mes collègues Stéphane Abadie et Denis Morichon, qui m'ont permis de collaborer avec eux sur différents applicatifs de génie côtier. Ces travaux ont ouvert des perspectives de recherche très stimulantes sur la supervision et l'instrumentation en génie côtier. La collaboration avec l'ingénieur Olivier Nouailletas a également joué un rôle précieux dans le déploiement de nombreuses expériences en génie côtier, et je tiens à le remercier chaleureusement pour l'efficacité et la qualité de cette collaboration.

Ma reconnaissance va également à mes collègues de l'IUT de Bayonne, dont la collaboration et le dynamisme ont été essentiels dans l'équilibre entre mes missions d'enseignement et mes activités scientifiques.

Enfin, j'adresse un remerciement tout particulier à Franck Luthon, Professeur des Universités, avec qui j'ai pu développer une grande partie de mes travaux de recherche. Sa rigueur scientifique, sa disponibilité et son esprit de collaboration ont constitué pour moi un appui précieux et une source d'inspiration.

Je tiens aussi à exprimer toute ma gratitude à ma femme Frédérique, dont la patience et le soutien ont été déterminants, en particulier dans la gestion de la logistique du foyer, ainsi qu'à mes enfants, Lola, Jules et Robin, pour leur présence bienveillante. Un mot également pour ma mère Michèle, qui m'a toujours soutenu dans mes choix, tant psychologiquement que financièrement durant mes études, et sans qui ce parcours n'aurait pas été possible.

Première partie

Activités de recherche doctorales

Introduction

A l'heure de la généralisation des objets connectés et du numérique, l'observation de données issues de systèmes multi-physiques, technologiques ou environnementaux est devenue essentielle. Dans divers domaines tels que l'éducation, l'industrie, l'environnement ou la gestion technique des bâtiments, l'apport du numérique constitue une avancée considérable pour suivre, caractériser et interagir avec des systèmes. La miniaturisation, l'accessibilité, la précision, le stockage et l'accès aux données issues d'une chaîne de mesures sont autant de perspectives intéressantes pour assurer le suivi, la pérennité et l'interaction avec certains systèmes technologiques. Toutes ces opportunités de suivi des systèmes ont été rendues possibles grâce aux évolutions des technologies de capteurs, de stockage et de traitement des données. La démocratisation du numérique que nous vivons depuis le début du siècle constitue une opportunité intéressante pour mieux comprendre ou mieux maîtriser les systèmes. Cependant, la captation massive de données peut engendrer certains problèmes dont il faut tenir compte. En effet, dans la chaîne d'acquisition de données (voir figure 1.1) le premier élément est le capteur. Le suivi et la robustesse de cet élément sont essentiels pour alimenter le reste de la chaîne. La transmission de données issues des capteurs doit être contrôlée pour assurer l'intégrité de la donnée durant son transport. Le stockage de l'information est nécessaire afin de traiter et analyser les données. La problématique du stockage massif est bien connue et doit aussi être maîtrisée afin que le traitement et l'analyse soient possibles en vue de valoriser la donnée acquise.

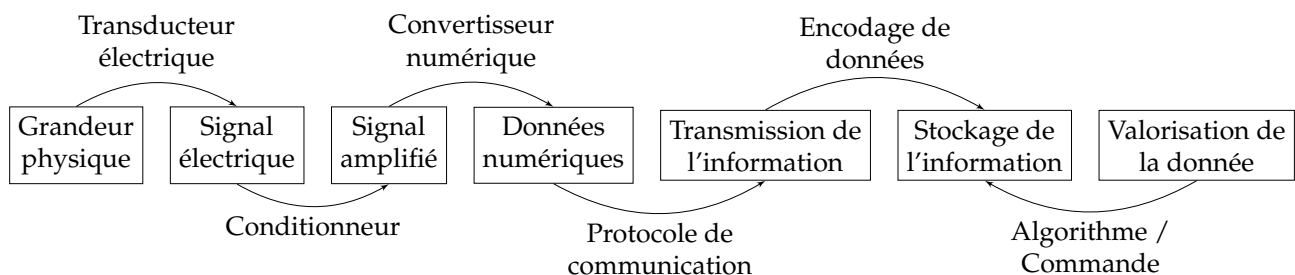


FIGURE 1.1 – La chaîne d'acquisition d'une instrumentation à distance.

L'objet de ce mémoire est de mettre en évidence les différentes contributions que j'ai pu apporter au cours de ma carrière sur différentes problématiques relatives à l'observation des données. Je commencerai par présenter les travaux de recherche effectués durant ma thèse de doctorat qui concernait la conception d'observateurs pour des systèmes linéaires - stationnaires ou non stationnaires - destinés à la détection et la localisation de fautes.

Depuis la fin de mon doctorat j'ai eu l'occasion de m'impliquer dans différents projets de recherche dans lesquels l'observation et la supervision de données étaient au cœur des

développements. En premier lieu, j'ai eu la chance d'intégrer le projet Laborem (*remote laboratory*) qui consiste en la conception et la réalisation de travaux pratiques à distance. Le traitement des requêtes des utilisateurs conduit à piloter des appareils d'une plateforme de travaux pratiques et à collecter les signaux ou mesures correspondant aux commandes de l'utilisateur.

En 2014, un besoin de collecte de données sur un laboratoire *in-situ* est apparu afin de confirmer les résultats issus des modèles utilisés par des collègues travaillant sur le déferlement des vagues et particulièrement durant des phénomènes extrêmes. Une observation de longue durée des signaux de pression des vagues sur des structures de défense côtières s'avère nécessaire pour assurer la captation de vagues exceptionnelles, typiquement des vagues submersives. Cette collaboration avec l'équipe [IVS](#) (Interaction Vague Structure) de mon laboratoire perdure et plusieurs perspectives liées notamment à la photogrammétrie et à la vision par ordinateur sont en cours d'étude (voir section [7.4](#)).

En 2018, j'ai souhaité développer un module pédagogique permettant de réaliser la supervision d'un système en production afin de réaliser des travaux pratiques sur le stockage de données. Le développement de ce module a été rendu possible grâce au déploiement de capteurs énergétiques au sein du bâtiment de l'IUT de Bayonne. L'analyse de l'enregistrement des données énergétiques couplées à d'autres types de données issues du bâtiment (fréquence d'utilisation, capteurs d'ambiance, emploi du temps, prévisions météorologiques, etc...) dégage des perspectives intéressantes pour un pilotage intelligent des systèmes techniques du bâtiment afin de tendre vers une meilleure sobriété énergétique. Ce pilotage intelligent s'appuie notamment sur des techniques issues du domaine de l'intelligence artificielle ([IA](#)). L'implantation logicielle d'algorithmes issus de l'[IA](#) est en cours d'étude et est présentée dans mon projet de recherche en section [7.5](#).

Les travaux de recherche sur chacune des thématiques présentées ont fait naître le besoin de développer un outil informatique de supervision afin de :

- collecter la donnée en prenant en charge un maximum de protocoles de communications en s'affranchissant du domaine d'application,
- stocker la donnée de façon uniforme. Quel que soit l'appareil interrogé, les données doivent être stockées et horodatées de façon similaire,
- présenter les données enregistrées en fournissant un panel d'objets graphiques pertinents selon le domaine d'application,
- appliquer des traitements pour valoriser les enregistrements collectés en utilisant des algorithmes ou plus simplement des tests élémentaires comme une comparaison à un seuil par exemple,
- partager l'accès aux données en fournissant aux différents usagers une interface correspondant à leurs besoins,
- déployer facilement les développements réalisés. Les solutions logicielles issues du monde du logiciel libre constituent une opportunité très intéressante pour ce genre d'applicatif.

Le développement du logiciel libre nommé [PyScada](#) issu des travaux de la dernière thèse que j'ai co-dirigé ont été faits dans ce sens. Ainsi, je présenterai cet outil dans le chapitre [6](#) relative à mes travaux de recherche.

Enfin, j'exposerai les différentes perspectives de recherche sur lesquelles je souhaite travailler dans la suite de ma carrière. J'exposerai les perspectives techniques pour le déploiement de l'outil [PyScada](#) mais également mes perspectives en recherche sur les différents applicatifs sur lesquels j'ai eu l'occasion de travailler depuis mon recrutement à l'Université de Pau et des Pays de l'Adour ([UPPA](#)).

Activité de recherche doctorale

Sommaire

2.1	Contexte	15
2.2	Problématique scientifique	16
2.3	Déroulement	16
2.4	Résumé de la thèse	16
2.4.1	DLF	16
2.4.2	Principe d'un observateur	17
2.4.3	Observateur de fonctionnelle linéaire	18
2.4.4	Observateurs à entrées inconnues	18
2.4.5	Génération de résidus structurés	19
2.4.6	Ouverture vers les SLNS	19
2.5	Publications	20
	Références personnelles	21
	Références	21

2.1 Contexte

Les travaux de recherche relatifs à mon doctorat concernent la construction d'observateurs de systèmes linéaires permettant la localisation de fautes. Ces travaux ont été financés pendant 3 ans par une allocation du Ministère (fin du contrat le 01/10/2007) et une année d'ATER à l'UPPA a permis de terminer les travaux de recherche de ma thèse.

Titre : Observateurs de systèmes linéaires : application à la détection et localisation de fautes.

Sous la direction du Pr. F. Rotella (LGP-INPT)

et la co-direction du MCF F. Nouredine (LGP-INPT)

Mémoire de thèse soutenu le 18 septembre 2008 devant le jury composé de :

J.P. Richard	Professeur à l'Ecole Centrale de Lille	Rapporteur
D. Maquin	Professeur à l'INPL	Rapporteur
M. Fadel	Professeur à l'ENSEIHT	Examineur - Président de jury
Y. Touré	Professeur au LVR	Examineur
F. Rotella	Professeur d'Université à l'ENIT	Directeur thèse
F. Nouredine	Maître de Conférences à l'ENIT	Co-directeur thèse

2.2 Problématique scientifique

Durant ces travaux de thèse je me suis attaché à étudier les systèmes linéaires non stationnaires (SLNS) car ce type de système reste assez inexploré par rapport aux travaux relatifs aux systèmes non linéaires. Un SLNS est un système dont les paramètres du modèle changent au cours du temps. Cette variation en fonction du temps est soit intrinsèque au système, soit issue d'une linéarisation d'un système non linéaire le long d'une trajectoire. L'objectif final de mes travaux est de détecter et de localiser des fautes (fautes actionneurs, fautes de mesures ou fautes d'un composant) sur ce type de modèle.

2.3 Dérroulement

Durant mes deux premières années de thèse, j'ai repris les travaux relatifs aux systèmes linéaires stationnaires (SLS) afin de les adapter aux SLNS. Il fallait dès lors se consacrer exclusivement aux méthodes de résolution pouvant s'adapter à des modèles non stationnaires.

L'applicatif principal de ma thèse était la détection et localisation de fautes (DLF). La DLF a fait l'objet, depuis les années 80, de nombreux travaux relatifs à la construction d'observateurs pour des SLS. Afin de détecter et localiser les fautes sur un système, on cherche à générer un signal significatif, appelé résidu, à l'aide d'un ou plusieurs observateurs, permettant de détecter l'occurrence d'une ou plusieurs fautes. Le type d'observateur utilisé pour générer des résidus "structurés" (sensible ou insensible à un certain type de fautes) est l'observateur à entrées inconnues (OEI).

La grande majorité des travaux dans le domaine concernent des SLS qui induisent une procédure de dimensionnement d'un observateur stationnaire. Les dimensionnements issus de ces procédures restent valables tout au long du temps car le modèle du système ne varie pas avec le temps. Afin de traiter les SLNS il a fallu s'attacher à trouver une procédure pouvant s'exécuter à chaque instant et qui permette de fournir un résidu significatif à l'aide d'un observateur non stationnaire. Il a aussi fallu considérer la notion de stabilité qui est très particulière pour les SLNS. Nous avons donc repris les équations fondamentales des OEI et nous avons proposé de nouvelles procédures pour les SLS mais dont l'adaptabilité aux SLNS est possible.

Par ailleurs, durant ma troisième année nous avons pu fournir une procédure de dimensionnement d'un OEI permettant une détection de fautes de mesures pour des SLNS.

Un résultat annexe à ces travaux concerne le dimensionnement d'un observateur de fonctionnelle linéaire destiné à la commande de systèmes stationnaires. En effet, les travaux effectués au début des années 2000 pouvaient être complétés afin de s'appliquer à un plus grand nombre de systèmes.

2.4 Résumé de la thèse

2.4.1 DLF

En raison des inconvénients au niveau du coût impliqué par l'approche DLF par l'espace de parité et de la difficulté de mise en œuvre de l'approche DLF par l'identification paramétrique pour un système non linéaire, l'approche observateur est celle qui a été retenue pour le développement de la thèse. L'idée générale de l'approche observateur pour la DLF consiste à estimer les sorties du système afin de les comparer aux mesures accessibles. En estimant les sorties on crée ainsi une redondance permettant de générer un résidu, qui

est un signal significatif de l'apparition d'une faute sur le système. Pour un modèle déterministe on utilise les observateurs de [1] et pour un modèle stochastique on se base sur l'utilisation des filtres de *Kalman* [2] et [3]. Ainsi, dans le cas déterministe on se sert de l'erreur de reconstruction de la sortie pour générer un résidu et dans le cas stochastique on se sert de l'erreur de prédiction comme résidu.

2.4.2 Principe d'un observateur

En général, pour des raisons techniques et économiques l'état du système n'est pas complètement accessible. En effet, la complexité de la réalisabilité technique ainsi que des coûts prohibitifs pour l'implantation de plusieurs capteurs peuvent réduire considérablement le nombre d'états mesurés. On peut alors considérer que pour la grande majorité des systèmes la dimension du vecteur d'état est supérieure à celle du vecteur de sortie ($l < n$). Cette considération signifie que pour tout instant t , le vecteur $x(t)$ ne peut pas être complètement mesuré ou déduit des sorties. Cependant, moyennant des conditions d'existence, l'état peut être reconstruit à l'aide d'un observateur. Ainsi, un dimensionnement judicieux d'un observateur doit permettre une estimation précise et rapide de la valeur des composantes du vecteur d'état $x(t)$.

Soit, de façon plus générale, le système dynamique $\mathcal{SYS}$ défini par :

$$\mathcal{SYS} : \begin{cases} \dot{x}(t) = f[x(t), u(t), f_a(t), f_c(t)] \\ y(t) = h[x(t), f_m(t)] \end{cases} \quad (2.1)$$

dont l'état $x(t)$ peut être estimé par un système dynamique appelé observateur et noté $\mathcal{OBS}$, dont la structure est donnée par :

$$\mathcal{OBS} : \begin{cases} \dot{z}(t) = \hat{f}[z(t), u(t), y(t)] \\ w(t) = \hat{h}[z(t), u(t), y(t)] \end{cases} \quad (2.2)$$

où $x(t) \in \mathbb{R}^n$, $u(t) \in \mathbb{R}^m$, et $y(t) \in \mathbb{R}^l$ représentent respectivement l'état, l'entrée et la sortie du système. $z(t) \in \mathbb{R}^n$, $w(t) \in \mathbb{R}^l$ représentent respectivement l'état et la sortie estimée de l'observateur. Les vecteurs $f_a(t) \in \mathbb{R}^{l_1}$, $f_m(t) \in \mathbb{R}^{l_2}$, et $f_c(t) \in \mathbb{R}^{l_3}$ représentent respectivement les fautes actionneurs, les fautes de mesure et les fautes composants.

On peut aussi décrire sa structure par le schéma de la figure 2.1.

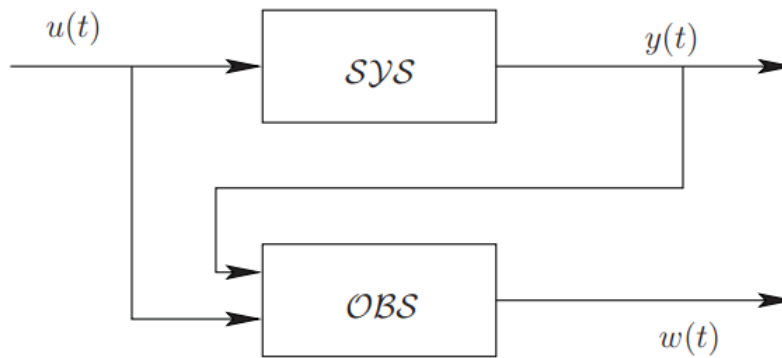


FIGURE 2.1 – Diagramme structurel d'un observateur.

Le système dynamique constituant l'observateur doit être dimensionné de telle sorte que l'erreur de reconstruction, définie par $e(t) = y(t) - w(t)$ tende asymptotiquement vers 0 :

$$\lim_{t \rightarrow \infty} e(t) = y(t) - w(t) = 0 \quad (2.3)$$

L'état d'un modèle représente l'ensemble des paramètres nécessaires pour connaître le comportement de la sortie d'un système en fonction des entrées auxquelles il est soumis. La modélisation d'un système grâce à ses équations d'état est donnée par l'équation d'état suivante :

$$\begin{aligned}\dot{x}(t) &= Ax(t) + Bu(t) + K_a f_a(t) + f_c(t) \\ y(t) &= Cx(t) + K_m f_m(t)\end{aligned}$$

où pour tout instant t , $A \in \mathbb{R}^{n \times n}$, $B \in \mathbb{R}^{n \times m}$ et $C \in \mathbb{R}^{l \times n}$, représentent des matrices constantes connues du système. Les matrices K_a et K_m sont des matrices connues de dimensions appropriées qui traduisent les effets des fautes sur le système.

2.4.3 Observateur de fonctionnelle linéaire

Le but est de concevoir le système dynamique suivant :

$$\begin{aligned}\dot{z}(t) &= Dz(t) + Hu(t) + Ey(t), \\ w(t) &= Pz(t) + Vy(t),\end{aligned}\tag{2.4}$$

où à chaque instant t , l'état de l'observateur $z(t)$ appartient à $\mathbb{R}^p$, et tel que :

$$\lim_{t \rightarrow \infty} (w(t) - Kx(t)) = 0.$$

Si cette dernière relation est vérifiée alors (2.4) est un observateur de fonctionnelle linéaire (OFL) et si p est minimal, nous obtenons un OFL minimal.

Une procédure de calcul algébrique a été établie dans ma thèse afin de dimensionner l'observateur de fonctionnelle linéaire. Cette contribution a donné lieu à une publication [4].

2.4.4 Observateurs à entrées inconnues

La conception d'OEI a fait l'objet à la fin du XX^{ème} siècle, de nombreux travaux, que ce soit pour la conception de commandes en présence de perturbations ou pour la génération de résidus en détection de fautes. Parmi les travaux précurseurs marquants, citons les travaux [5] et [6] qui posent les fondements de la construction d'observateurs quand le comportement des entrées inconnues est supposé régi par une équation différentielle.

Soit le SLS, où intervient une entrée inconnue $v(t)$, dont la représentation d'état est donnée ci-dessous :

$$\begin{aligned}\dot{x}(t) &= Ax(t) + Bu(t) + Dv(t), \\ y(t) &= Cx(t) = \begin{bmatrix} I_l & 0_{l, n-l} \end{bmatrix} x(t),\end{aligned}\tag{2.5}$$

où pour tout instant t , $v(t) \in \mathbb{R}^r$ et $y(t) \in \mathbb{R}^l$ et la matrice $D \in \mathbb{R}^{n \times r}$ représente la matrice de distribution de l'entrée inconnue.

Un OEI d'ordre plein permettant d'estimer $x(t)$ en étant insensible à la perturbation est défini par :

$$\dot{z}(t) = Nz(t) + Qu(t) + Ly(t),\tag{2.6}$$

$$\hat{x}(t) = z(t) - Ey(t),\tag{2.7}$$

où pour tout instant t , $\hat{x}(t) \in \mathbb{R}^n$ est l'état estimé tandis que $N \in \mathbb{R}^{n \times n}$, $Q \in \mathbb{R}^{n \times m}$, $E \in \mathbb{R}^{n \times l}$ et $L \in \mathbb{R}^{n \times l}$ sont des matrices constantes à déterminer. Les relations qui déterminent l'OEI

sont telles que l'erreur d'estimation $e(t)$ converge asymptotiquement vers 0 (équation 2.3). En posant $P = I_n + EC$, les relations qui en découlent s'écrivent [7] :

$$N \text{ est une matrice de Hurwitz,} \quad (2.8)$$

$$PA - NP = LC, \quad (2.9)$$

$$Q = PB, \quad (2.10)$$

$$PD = 0, \quad (2.11)$$

La dernière équation traduit le fait que l'erreur d'estimation doit être insensible à la perturbation $v(t)$. Si (2.10) peut être traitée a posteriori car elle définit la matrice Q , (2.9) et (2.11), sous la contrainte (2.8), doivent conduire à la détermination de N , E et L .

Une procédure permettant le dimensionnement complet d'un OEI a été présentée dans ma thèse et a fait l'objet d'une publication [8].

2.4.5 Génération de résidus structurés

Les procédures dédiées à la conception d'observateurs permettent de générer plusieurs observateurs appelés aussi banc d'observateurs. Les résidus structurés sont conçus par l'intermédiaire d'un banc d'observateurs ce qui va permettre de générer plusieurs résidus. La procédure la plus communément utilisée pour l'isolation de fautes consiste à générer des résidus dont chacun est insensible à une seule faute et sensible à toutes les autres. On parlera alors de résidus généralisés. En figure 2.2 un résultat de simulation sur un système d'ordre 3 est disponible. Les 2 actionneurs et les 2 capteurs peuvent être sujets respectivement aux fautes actionneurs f_{a_1} et f_{a_2} et aux fautes de mesure f_{m_1} et f_{m_2} .

Un banc d'observateurs nous permet de détecter et de localiser f_{a_1} ou f_{a_2} et de détecter f_{m_1} et f_{m_2} . On procède de la façon suivante :

- construire un OEI pour générer un résidu $r_1(t)$ insensible à f_{a_1} ;
- construire un OEI pour générer un résidu $r_2(t)$ insensible à f_{a_2} ;
- construire un observateur pour générer un résidu $r(t)$ sensible à toutes les fautes.

Les travaux issus de la génération de résidus structurés ont fait l'objet de plusieurs publications [9, 10, 11].

2.4.6 Ouverture vers les SLNS

L'étude de la détection de fautes sur les SLNS revêt une importance capitale car elle permet de modéliser plus précisément de nombreux systèmes.

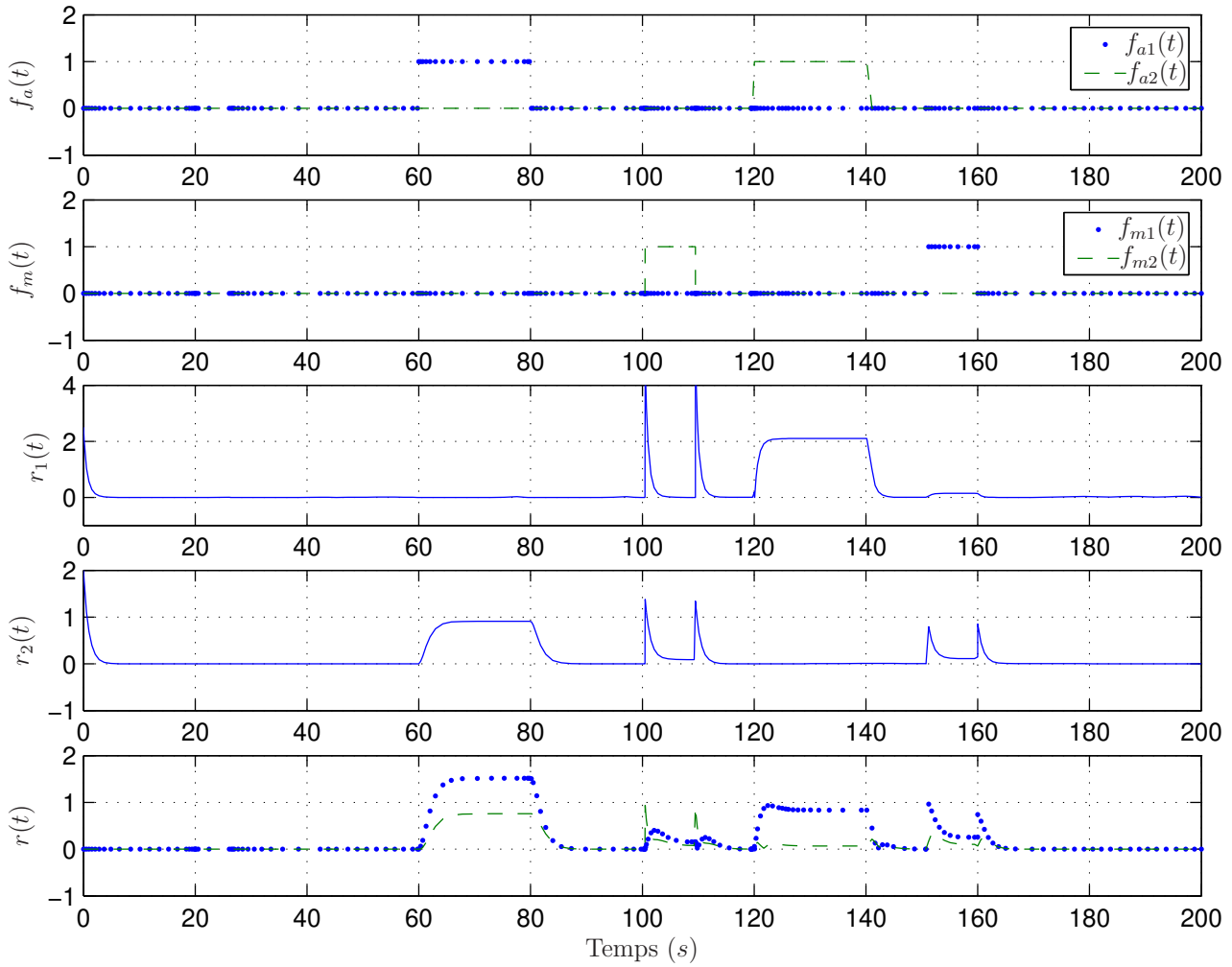
Un SLNS est un modèle linéaire à coefficients variables dans le temps. Les SLNS permettent de décrire un système lorsque par exemple la dérive d'un composant est connue au cours du fonctionnement ou lorsque le principe de fonctionnement implique des coefficients à variation périodique, ou bien lorsque l'on cherche à linéariser un processus non linéaire, non pas autour d'un point de fonctionnement, mais le long d'une trajectoire.

Un SLNS peut se modéliser par l'équation d'état suivante :

$$\begin{aligned} \dot{x}(t) &= A(t)x(t) + B(t)u(t), \\ y(t) &= C(t)x(t) = \begin{bmatrix} I_l & 0_{l,n-l} \end{bmatrix} x(t), \end{aligned} \quad (2.12)$$

où pour tout instant t , les matrices $A(t) \in \mathbb{R}^{n \times n}$, $B(t)$ et $C(t) \in \mathbb{R}^{n \times m}$ représentent des matrices connues dépendantes du temps.

Les résultats établis dans le cadre stationnaire concernant les procédures de dimensionnement des observateurs ne peuvent être étendus et les interprétations qui en découlent en

FIGURE 2.2 – Résidus $r_1(t)$, $r_2(t)$ et $r(t)$.

terme de zéros ou de pôles sont alors faussées. D'autres contraintes sont alors à prendre en compte et nécessiteraient plus de recherche afin d'étendre les résultats obtenus pour les [SLS](#). Néanmoins certaines procédures pourraient facilement prendre en compte les contraintes liées au placement des pôles. En effet, la reprise d'une technique issue du dimensionnement d'un [OEI](#) réduit pour les [SLS](#) peut s'adapter aux [SLNS](#). L'utilisation des 1-inverses généralisées permet, dans un premier temps, de simplifier les équations fondamentales de l'[OEI](#) et, dans un second temps, de fournir des degrés de liberté pour fixer arbitrairement les dynamiques de l'observateur.

2.5 Publications

Les travaux de recherche effectués pendant cette thèse ont donné lieu à 3 publications dans des revues internationales, 1 conférence internationale et 1 conférence nationale listées ci-après [\[4, 8, 9, 10, 11\]](#).

Références personnelles

- [4] B. LARROQUE, F. NOUREDDINE et F. ROTELLA. « Towards a complete linear functional observer design ». In : *International Review of Automatic Control*, ISSN 1974-6059 1 (2008). DOI : [ISSN1974-6059](https://doi.org/10.1080/19746059.2008.1043166).
- [8] B. LARROQUE, F. NOUREDDINE et F. ROTELLA. « Modélisation d'observateurs pour la détection de fautes actionneurs et la localisation de fautes de mesure. Détection et localisation de fautes actionneurs ». In : *Journal Européen des Systèmes Automatisés* 44 (2010), p. 205-270. DOI : [10.3166/jesa.44.255-270](https://doi.org/10.3166/jesa.44.255-270).
- [9] F. NOUREDDINE, B. LARROQUE et F. ROTELLA. « Fault tolerance in Robotics ». In : *International Journal of Mechatronics and Manufacturing Systems* 2 (2009). DOI : [10.1504/IJMMS.2009.026045](https://doi.org/10.1504/IJMMS.2009.026045).
- [10] B. LARROQUE, F. NOUREDDINE et F. ROTELLA. « New residual generation design for fault detection ». In : *IFAC World Congress, Séoul*. 2008.
- [11] B. LARROQUE, F. NOUREDDINE et F. ROTELLA. « Procédure pour la localisation des fautes actionneurs et des fautes de mesures sur des systèmes linéaires stationnaires ». In : *MOSIM'08, Paris*. 2008.

Références

- [1] D. LUENBERGER. « An introduction to observers ». In : *IEEE Trans. Aut. Control* 16 (1971), p. 596-602.
- [2] R. E. KALMAN. « A New Approach to Linear Filtering and Prediction Problems ». In : *Transactions of the ASME - Journal of Basic Engineering* 82 (1960), p. 35-45.
- [3] R. E. KALMAN. « New Results in Linear Filtering and Prediction Theory ». In : *Transactions of the ASME - Journal of Basic Engineering* 83 (1961), p. 95-107.
- [5] G. HOSTETTER et J. MEDITCH. « Observing systems with unmeasurable inputs ». In : *IEEE Trans. Automat. Contr.* 18 (1973), p. 307-308.
- [6] C. D. JOHNSON. « Observers for linear systems with unknown and inaccessible inputs ». In : *Int. Journal of Control* 21 (1975), p. 825-831.
- [7] D. MAQUIN et J. RAGOT. *Diagnostic des systèmes linéaires*. Hermes Science, 2000.

Deuxième partie

Activités de recherche postdoctorales

Introduction

Lors de ma prise de poste à l'[UPPA](#) en 2010 j'ai été affecté :

- au département Génie Industriel et Maintenance ([GIM](#)) à l'IUT de Bayonne Pays Basque pour la partie enseignement
- à l'équipe Procédés Haute Tension ([PHT](#)) du laboratoire des sciences pour l'ingénieur appliquées à la mécanique et au génie électrique ([SIAME](#))

Cette création de poste en 2010 a été motivée par un fort besoin en enseignement au département Génie Industriel et Maintenance qui a ouvert ses portes en 2007. Le profil recherche n'a pas été le critère de choix prioritaire pour mon recrutement et j'ai ainsi eu une certaine liberté pour m'insérer dans les thématiques de mon équipe de recherche. De plus, je suis le seul de mon équipe basé sur la côte Basque alors que l'ensemble de l'équipe est basé à Pau. Cependant, très attiré par la recherche et soucieux de conserver une activité dans un de ses domaines, j'ai rapidement pu collaborer avec un collègue de l'IUT appartenant à ma section CNU, le professeur Franck Luthon. Ainsi, je me suis fortement impliqué dans un de ses projets qui concerne l'instrumentation de travaux pratiques à distance, le projet Laborem. De plus, nous avons eu l'opportunité de travailler sur deux applicatifs en traitement d'image et vision par ordinateur. Le premier projet était en lien avec le projet Laborem et visait à contrôler des drones afin d'interagir avec un apprenant lors d'un scénario d'apprentissage à distance. Le deuxième projet était en lien avec les activités de l'UMR Ecobiop. Ces travaux visaient à observer des civelles en bassin à l'aide de caméras afin d'étudier leur comportement de façon automatisée.

En 2014, j'ai été sollicité par un collègue de mon laboratoire appartenant à l'équipe [IVS](#). Cette équipe développe des recherches sur les vagues et leurs impacts au sens large et avait besoin d'instrumenter la digue de l'Artha, ouvrage de défense en *off-shore* protégeant la baie de Saint-Jean de Luz. Il s'agissait de concevoir et déployer une installation pour la mesure des pressions d'impact engendrées par les vagues sur l'ouvrage. L'observation continue des impacts a fourni une très grande quantité de données qu'il a fallu analyser et traiter pour valoriser cette masse de données. Ainsi nous avons pu développer du traitement de signal pour caractériser chaque signal d'impact enregistré, couplé à du *machine learning* pour classer ces différents signaux.

L'outil informatique permettant de superviser les données est un point clé lorsque l'on souhaite observer des données sur un temps long. Ainsi nous avons pu mener des travaux à ce sujet afin de contribuer à développer un logiciel de supervision libre et générique pour proposer une solution logicielle pouvant s'adapter à un très grand nombre d'applications.

Laboratoires distants - Remote lab

Sommaire

3.1 Introduction	27
3.2 Problématiques et exigences	28
3.3 État de l'art	29
3.4 Un prototype opérationnel - 2009/2014	30
3.5 Impact sur la motivation des étudiants	34
3.6 Plateforme Laborem depuis 2017	36
3.6.1 Contexte	36
3.6.2 Description du matériel	38
3.6.3 Partie logicielle	40
3.7 Synthèse	40
Références personnelles	42
Références	43

3.1 Introduction

L'enseignement à distance revêt de nos jours un enjeu capital pour l'accès à la formation. Depuis la pandémie du COVID-19 en 2020 et les périodes de confinement qui y ont été associées, le télétravail et les accès à distance se sont largement démocratisés. En 2010, lors de ma prise de fonction à l'UPPA l'enseignement à distance n'en était encore qu'à ses prémices. Nous avons développé une architecture de laboratoire à distance, appelée **Laborem**, qui a été mise en place pour expérimenter l'e-learning au département **GIM**. En effet, l'IUT de Bayonne encourage l'introduction de l'apprentissage à distance pour l'éducation des étudiants en génie électrique, génie mécanique, maintenance et informatique, que ce soit pour apprendre à travailler à distance ou pour la formation tout au long de la vie. Le projet **Laborem** a évolué de la manière suivante : dans une première collaboration avec l'Université Polytechnique de Bucarest (UPB), en Roumanie, une architecture ouverte a été proposée pour un laboratoire à distance, basée sur le concept de *plugins* d'instruments virtuels [1]. Il s'agissait d'une application client-serveur.

Ensuite, un scénario de type jeu (*Game-Like* [2]) a été mis en œuvre au sein d'un espace numérique de travail (Learning Management System : **LMS**), de sorte que la dimension collaborative soit ajoutée aux travaux pratiques à distance, ainsi que la supervision des activités des étudiants.

À partir de 2014, afin d'améliorer le sentiment d'immersion et accroître la motivation de l'étudiant, l'apprenant dispose d'outils d'interaction : un bras robotisé joue le rôle de la main de l'étudiant pour choisir et placer les composants électroniques afin de construire le dispositif à tester, et un tableau des scores Top 10 des meilleures réponses aux résultats de mesure est affiché [3].

Toujours dans l'optique d'améliorer la sensation d'immersion pour l'apprenant, nous avons effectué des travaux de recherche en vision par ordinateur afin de rendre la caméra mobile par l'intermédiaire d'un drone (section 4.2).

La solution proposée dans [Laborem](#) est une alternative au câblage virtuel d'une matrice de commutation implémentée dans [4, 5]. Suite à différents retours d'expérience des étudiants ayant utilisé [Laborem](#), il était essentiel de résoudre le problème de la compatibilité de l'application web côté client. Afin de remédier à ce problème et d'étudier la reproductibilité et le transfert de ce prototype nous avons développé une plateforme libre et ouverte, à la fois matérielle (voir section 3.6) et logicielle (voir section 6).

3.2 Problématiques et exigences

Diverses problématiques peuvent être rencontrées lors du développement d'un laboratoire à distance. Tout d'abord, on peut aborder la sociologie de la connaissance technique, en tenant compte du public cible que sont les étudiants de première année de premier cycle, qui ont environ 18-19 ans. Pour ce public, qui manque parfois de motivation personnelle dans leurs études, nous pensons que l'apprentissage basé sur le jeu et l'apprentissage adaptatif sont de bonnes solutions à promouvoir, comme dans [6] pour l'informatique.

De plus, la coopération internationale entre les universités technologiques est rendue possible, en particulier dans les cursus de [GIM](#), où les travaux pratiques ont une importance capitale. Les universités qui ne disposent pas d'instruments modernes peuvent ainsi utiliser des équipements disponibles dans une autre université grâce à une connexion Internet. Cela fait partie de l'objectif de démocratisation de la connaissance technique. L'IUT de Bayonne a déjà des partenariats solides avec l'Amérique Latine dans les domaines de la gestion, du commerce et de l'informatique. Il vise à étendre son partenariat au domaine technique du [GIM](#), en particulier avec des pays africains qui sont en déficit de matériels permettant de mettre en œuvre des travaux pratiques. À cet effet, certains aspects sont primordiaux pour les utilisateurs : (i) confort (facilité d'utilisation pour les étudiants et les tuteurs); (ii) extensibilité (capacité à déployer de nouvelles expériences à distance); (iii) portabilité (compatibilité technique côté client).

Un autre point majeur est l'aspect financier. En effet, dans le contexte économique actuel mondial, des réductions drastiques sont effectuées par les gouvernements dans les budgets affectés au domaine de l'éducation. Il faut réduire les coûts de l'apprentissage tout en gardant des équipements non obsolètes. La mutualisation des équipements coûteux grâce aux laboratoires distants est alors une bonne solution (pas besoin d'acheter un logiciel coûteux côté client, pas besoin d'acheter de nombreux instruments).

Un dernier point clé est d'alléger les contraintes sur les ressources (humaines, spatiales et temporelles, en dehors des ressources financières) imposées par les activités pratiques (besoin d'enseignants, de salles et de créneaux horaires dédiés, en dehors des besoins d'investissements coûteux). Le partage des ressources et des infrastructures [7] fait alors partie de l'écologie de la connaissance technique, pour une société durable.

3.3 État de l'art

La pratique est reconnue comme une partie essentielle de l'apprentissage dans l'éducation en ingénierie. Comme l'évalue une étude sur l'efficacité des laboratoires virtuels [8], environ 50% de l'apprentissage a lieu pendant les travaux pratiques.

Les avantages et inconvénients des trois types de laboratoires (manipulation réelle, virtuelle et en distanciel) sont bien connus [9]. Par laboratoire virtuel, on entend des laboratoires basés uniquement sur des simulations (modèles mathématiques implémentés dans un ordinateur), alors que les laboratoires à distance utilisent des instruments réels dans un laboratoire physique.

Les laboratoires virtuels appartiennent au groupe générique des *e-labs* (rendus possibles grâce au développement d'Internet), version moderne des laboratoires traditionnels effectués devant des dispositifs réels. Étant donné que l'accès aux laboratoires réels est restreint en raison du nombre élevé d'étudiants, du coût des équipements, des besoins en approvisionnement et en maintenance, les *e-labs* sont d'excellentes alternatives pour atténuer ces contraintes.

Un autre argument en faveur des laboratoires réels à distance (par rapport aux laboratoires virtuels) est le fait qu'aujourd'hui, dans l'industrie, de plus en plus d'activités d'ingénierie se déroulent à distance, par exemple la maintenance de systèmes ou le contrôle de processus via une interface informatique dans une salle de supervision à distance (en anglais : Supervisory Control And Data Acquisition ou [SCADA](#)). Il est donc essentiel de former les étudiants à cette nouvelle manière de travailler.

Cependant, les points faibles des laboratoires à distance résident dans l'interaction avec les instruments et entre les personnes. C'est pourquoi, un logiciel intelligent est nécessaire [10] entre le matériel et les humains afin de : (i) concevoir une architecture ouverte (suffisamment flexible) pour le contrôle à distance des dispositifs matériels (besoin technique) et (ii) développer des outils et des interfaces pour permettre et suivre le comportement cognitif de l'utilisateur dans une application d'instrumentation à distance (besoin humain).

De tels projets pluridisciplinaires nécessitent des équipes aux compétences variées : enseignants (tuteurs) qui conçoivent les activités pratiques et évaluent les étudiants, experts en sciences cognitives (pour concevoir des modèles de scénarios), concepteurs d'interfaces homme-machine, programmeurs en informatique, gestionnaires de réseaux et de systèmes et techniciens chargés de la maintenance continue.

La complémentarité des activités est bien connue : une pédagogie mixte incluant des manipulations réelles, des simulations et des contrôles à distance est préférable, ce que l'on appelle l'apprentissage mixte (*blended learning* en anglais). Cependant, lorsque des activités à distance sont développées, les aspects motivationnels sont très importants pour l'autorégulation de l'apprentissage. Par exemple, un contrôleur de motivation basé sur la logique floue est développé en Java et intégré à Moodle dans [11]. Cela permet d'estimer la motivation de l'étudiant, et donc de proposer la meilleure charge de travail en fonction de divers paramètres (autonomie, performance, participation, anxiété).

Pour évaluer la qualité des laboratoires à distance, il est également nécessaire d'effectuer une évaluation, à la fois technique et pédagogique. L'évaluation de l'usage de l'infrastructure du laboratoire (matériel et logiciel) est obligatoire [12] : communication en temps réel vs. communication asynchrone, enregistrement des actions et des données, mesure de la performance des utilisateurs, etc. Pour obtenir des informations en temps réel sur l'état d'avancement d'un étudiant et pour les procédures d'évaluation automatique, l'utilisation d'un [LMS](#) est requise [13, 14, 15]. Dans [16], un modèle théorique est proposé pour évaluer la connaissance et la progression de l'apprentissage de manière intégrée et non invasive, dans le contexte des jeux numériques éducatifs, en remplacement des tests formels classiques que

les étudiants doivent passer. Cela souligne l'importance d'un équilibre approprié entre jeu et apprentissage, ainsi qu'entre les défis ludiques et les capacités de l'apprenant.

3.4 Un prototype opérationnel - 2009/2014

Contexte

Dans le cadre du cursus académique pour le Diplôme Universitaire de Technologie (DUT) du département [GIM](#), le cours d'électronique analogique (ENA) abordait les sujets suivants : amplificateurs opérationnels, filtres actifs, boucles de rétroaction, oscillateurs et régulateurs.

Les objectifs d'apprentissage de l'ENA étaient de mettre en œuvre des fonctions électroniques de base (amplification, filtrage, etc.) avec des systèmes simples basés sur des amplificateurs opérationnels et d'utiliser des instruments pour les tests et les mesures. Les travaux pratiques, pouvant se réaliser à distance, concernaient la caractérisation de circuits électroniques. Une partie ou la totalité de ces travaux pratiques pouvait être effectuée à distance. Depuis la réforme du BUT en 2021, les compétences abordées en ENA ont été intégrées à la ressource R1.04 - Génie Electrique 1.

La plateforme de laboratoire est basée sur la conception et le contrôle d'instruments virtuels (VIs) pour la gestion d'expérimentations à distance via le web, ainsi que sur l'utilisation du LMS pour la gestion des étudiants et la supervision du travail collaboratif. Outre l'architecture ouverte client-serveur qui permet le contrôle à distance des instruments en temps réel, avec la gestion technique de la liste des expériences et des utilisateurs répertoriés, comme indiqué dans [\[17\]](#), l'originalité du travail proposé dans [\[3\]](#) est double :

- une sensation d'immersion dans le laboratoire via un retour vidéo, un bras robotisé pour le placement des composants, en recourant à la vision par ordinateur et au traitement d'image pour répondre aux demandes spécifiques des utilisateurs.
- un scénario de type jeu est mis en œuvre comme approche d'apprentissage, avec une tentative d'imiter le comportement des étudiants lorsqu'ils travaillent ensemble (travail collaboratif par l'utilisation de chat, forum, tableau d'honneur *Top 10*) et avec un parcours d'apprentissage adapté à chaque étudiant. Ce travail est l'une des premières tentatives de combiner trois dimensions : laboratoires à distance, [LMS](#) et jeux.

La partie matérielle du prototype développé est illustrée à la figure [3.1](#).

Architecture réseau et logicielle

L'architecture réseau et logicielle est illustrée à la figure [3.2](#).

Elle est conçue pour permettre la communication entre le [LMS](#) (environnement *middleware* comprenant des bases de données pour la gestion des utilisateurs, l'authentification, l'administration, les outils d'apprentissage, le conditionnement des contenus, l'évaluation, ainsi que des outils de communication pour le travail collaboratif) et le laboratoire distant (matériel incluant les instruments avec leurs pilotes logiciels).

Côté serveur

L'architecture matérielle repose sur l'utilisation de deux serveurs. En plus du serveur web de l'université, utilisé pour se connecter au [LMS](#) via le webcampus, le département industriel possède un serveur dédié (labserver) pour la connexion aux instruments (figure [3.3](#)).

Elle comprend des dispositifs de test et de mesure (générateur de formes d'onde, multimètre, oscilloscope, analyseur de spectre, alimentation programmable) connectés via GPIB,

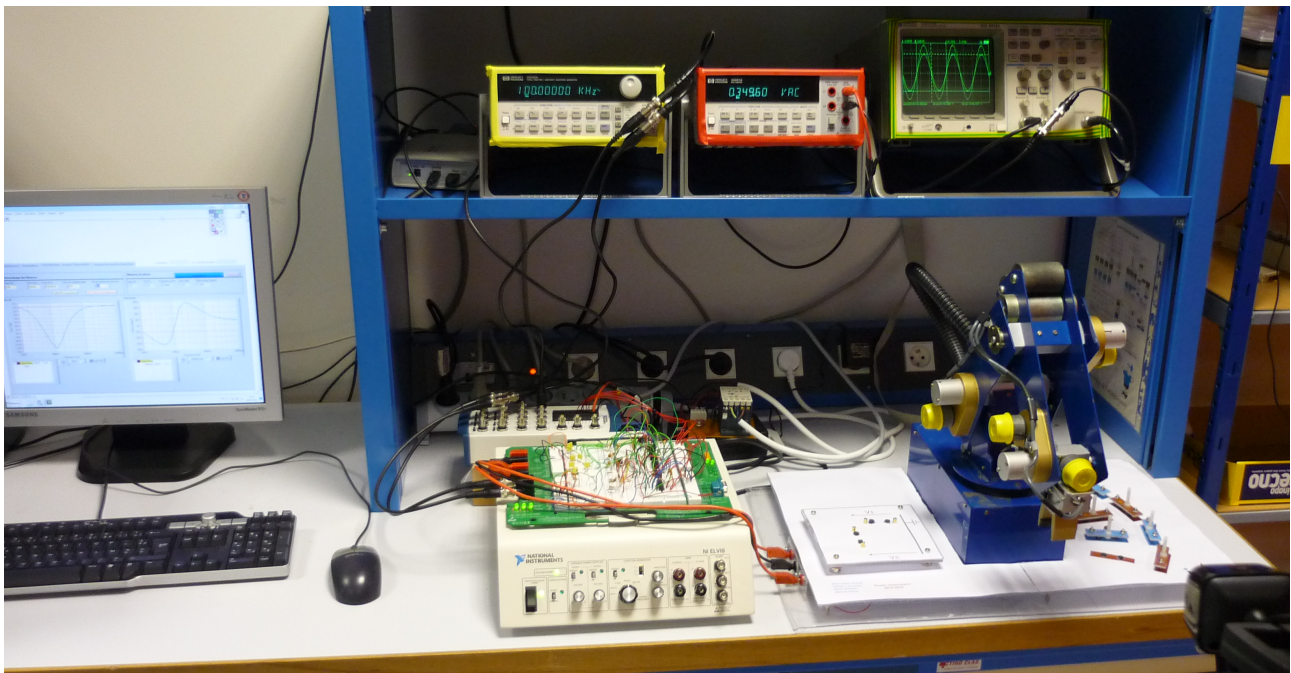


FIGURE 3.1 – Ressources matérielles côté serveur.

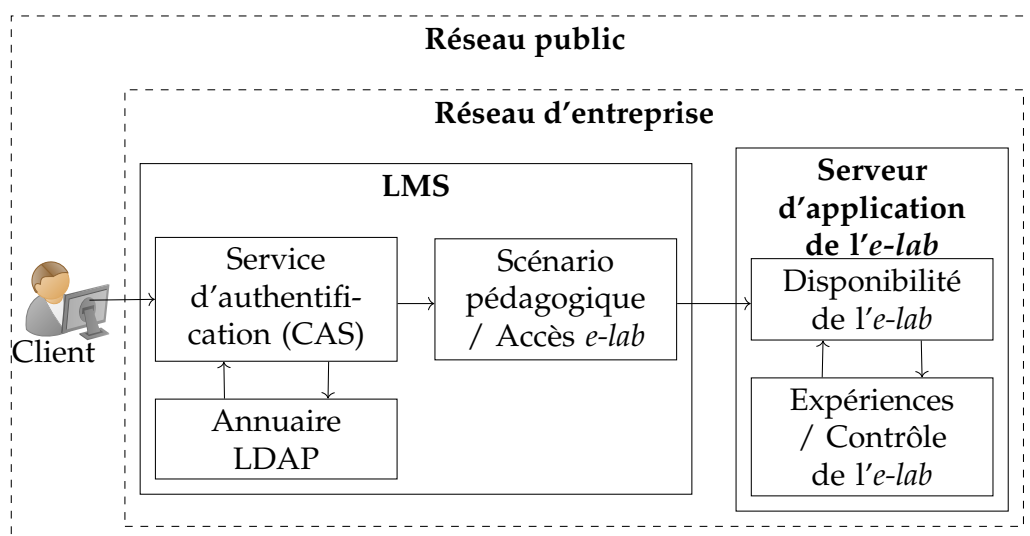
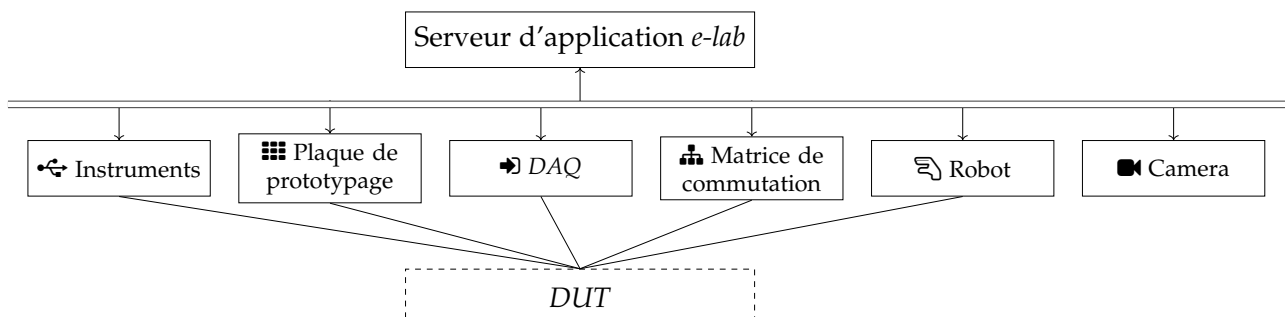
FIGURE 3.2 – Vue d'ensemble de l'architecture du système [Laborem](#).

FIGURE 3.3 – Architecture matérielle : D.U.T. signifie dispositif sous test; DAQ signifie acquisition de données.

ainsi que divers autres systèmes matériels (caméra, carte d'acquisition de données, matrice de commutation avec relais, bouton marche-arrêt, platine électronique, bras robotisé, éclair-

rage automatique de fond, etc.) connectés via USB, RS232 ou sans fil.

Le schéma bloc de l'application est illustré à la figure 3.4.

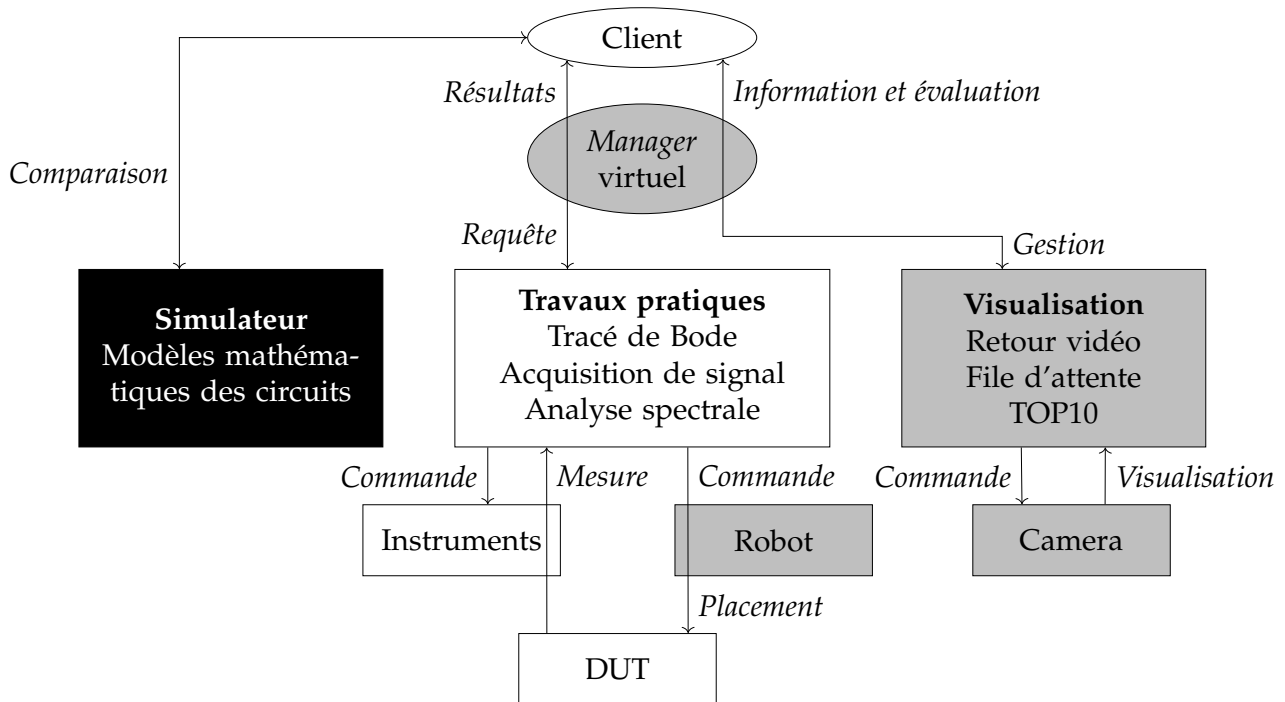


FIGURE 3.4 – Schéma bloc de l'application : les blocs en gris correspondent aux fonctions ajoutées pour obtenir un laboratoire distant à partir d'un laboratoire sur place (blocs en blanc).

L'application est composée de six VIs répertoriés dans [3]. Ces VIs sont construits et contrôlés avec le logiciel NI-LabVIEW. Leurs panneaux de contrôle distants sont intégrés dans des pages [HTML](#) accessibles via le serveur web de LabVIEW.

Côté client

L'installation côté client est simple. En effet, un seul programme doit être téléchargé et installé : le *LabVIEW RunTime Engine*. L'installation ajoute automatiquement un *plugin* au navigateur web du client. Ce *plugin* permet d'exécuter le code objet du panneau de contrôle distant intégré dans une page [HTML](#).

L'accès aux travaux pratiques à distance est l'une des nombreuses activités proposées en ligne aux étudiants (parmi d'autres telles que la diffusion de contenu, les quiz et tests, les simulateurs, les démonstrations, les tutoriels, l'assistance, les enquêtes, les forums, etc.). Il est simplement accessible en pointant vers une URL spécifique, située physiquement sur le serveur de laboratoire directement connecté aux instruments. La figure 3.5 montre une interface typique vue par le client.

L'utilisateur construit son propre circuit en pilotant le bras robotique, effectue des mesures en temps réel, bénéficie d'un retour visuel du laboratoire via une caméra, et obtient des informations sur la file d'attente des utilisateurs avec un compteur de temps, afin de savoir précisément quand il sera servi ou déconnecté. Pendant ce temps, il peut passer à d'autres activités proposées (e.g. simulations, tests,...).

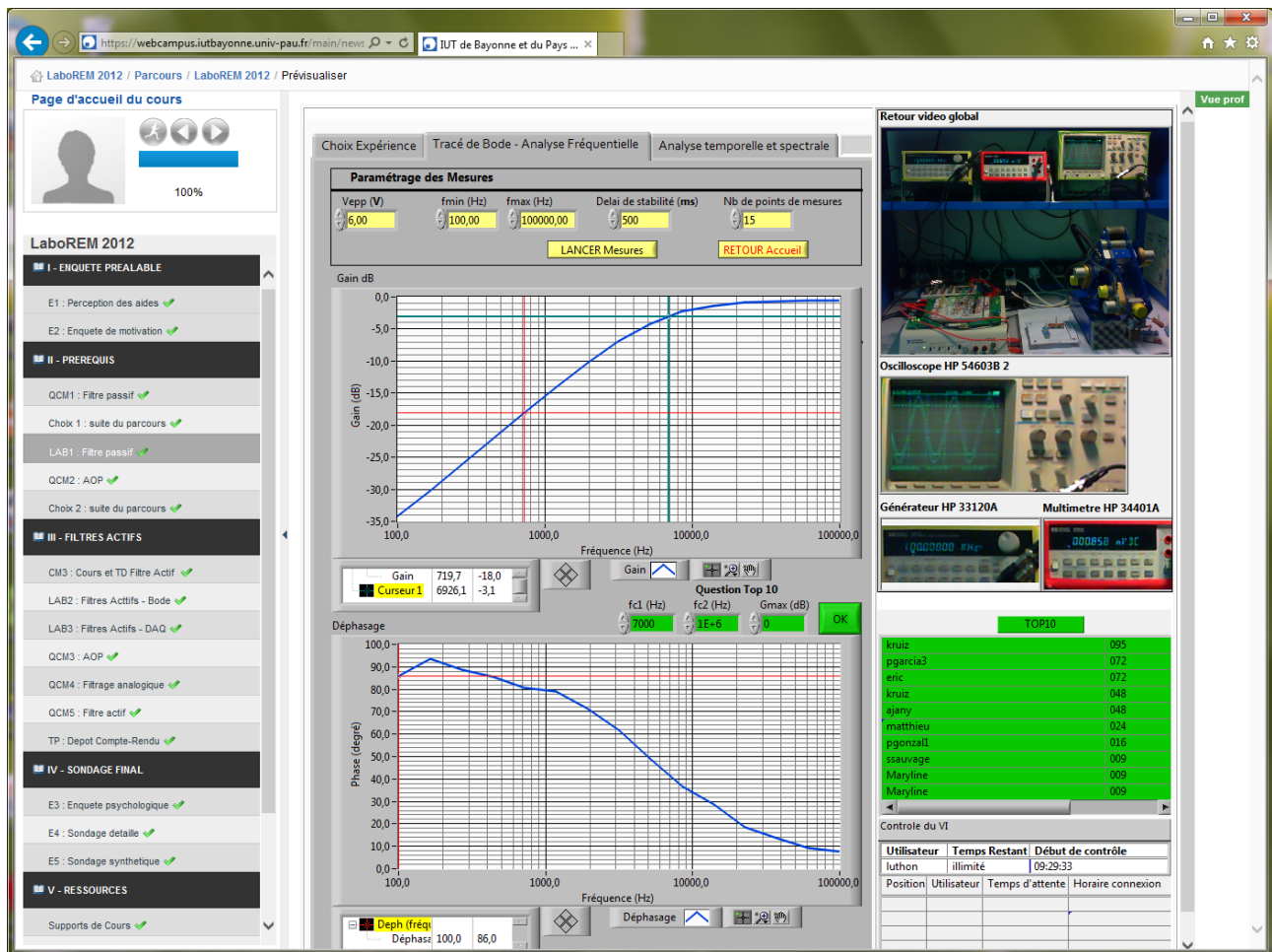


FIGURE 3.5 – Interface client montrant un panneau de contrôle distant - A gauche : étapes d'apprentissage du scénario pédagogique - au centre : résultats de l'expérience en cours - à droite : retour vidéo, Top 10 et liste d'attente des utilisateurs.

Bras robotique pour le placement de composants

Laborem construit le circuit en utilisant un bras robotique. En plus des circuits construits par le robot, il y a aussi 8 filtres passifs et actifs précâblés sur la platine de prototypage, de sorte que l'étudiant puisse choisir soit de construire son propre filtre, soit d'utiliser ceux précâblés. Le choix du filtre se fait simplement dans l'interface client en sélectionnant le type de filtre et les valeurs des composants (dans la version minimale actuelle du prototype, seuls deux composants peuvent être choisis parmi 8 valeurs : 4 résistances et 4 condensateurs).

Scénario pour l'apprentissage à distance

Il est bien connu que la motivation des étudiants pratiquant l'apprentissage à distance peut non seulement être modélisée et mesurée, mais aussi favorisée avec l'utilisation appropriée d'un LMS (modèle ARCS [18]). De plus, l'utilisation de jeux peut également contribuer à renforcer la motivation, bien qu'il soit encore incertain dans quelle mesure les jeux pédagogiques affectent directement les résultats d'apprentissage [19].

Ici, un parcours d'apprentissage poly-linéaire est implémenté dans le LMS sous la forme d'une "chasse au trésor", adaptée au niveau de compétence et à la motivation de l'étudiant. Les niveaux de compétence et de motivation sont mesurés par une procédure d'évaluation automatique (quiz, tests et enquêtes). En fonction du niveau, un indicateur (rouge, orange ou vert) est généré pour orienter l'étudiant vers le meilleur parcours et avec la charge de

travail la plus appropriée à son niveau, comme dans [11].

Scénario pédagogique

Le scénario de type jeu [2] est basé sur quatre concepts, comme dans les jeux vidéo : niveaux, vies, points et temps. Quatre compteurs sont donc utilisés pour évaluer l'activité de l'étudiant : un chronomètre, un compteur du meilleur niveau atteint (niveau de difficulté), un compteur du nombre de vies utilisées (nombre d'essais), et un compteur de score (notes obtenues aux quiz en ligne et à l'examen final). Cela permet d'estimer un indice de performance [11] pour stimuler la motivation dans l'apprentissage à distance auto-régulé.

Le scénario est décrit dans la figure 3.6.

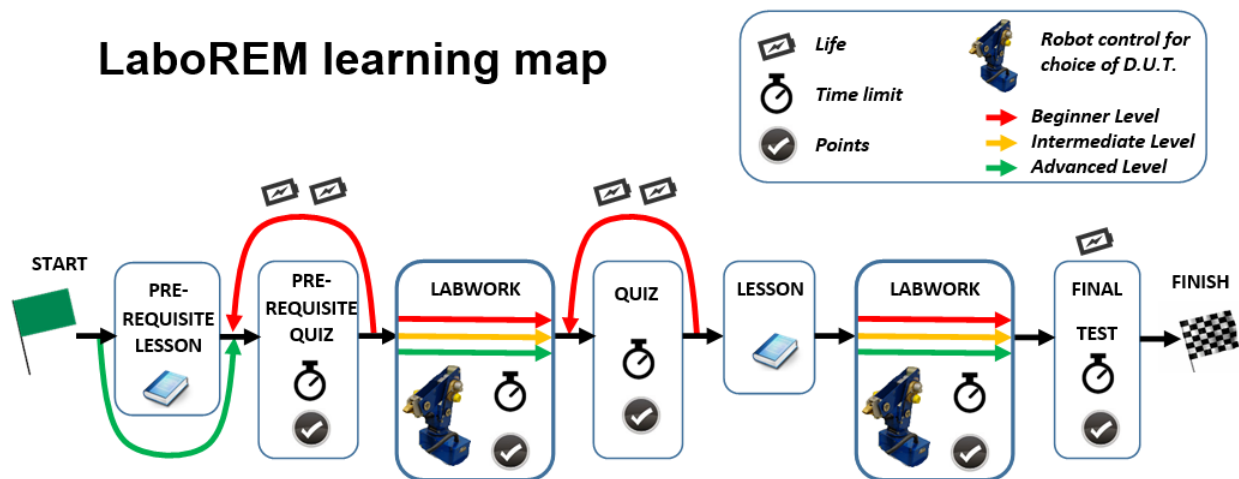


FIGURE 3.6 – Carte d'apprentissage sous forme de chasse au trésor avec diverses étapes : départ, arrivée, test, évaluation, contrôle du laboratoire à distance, aide, documentation, etc.

Un scénario type contient : (i) vidéoprésentation du laboratoire et des expériences¹; (ii) test sur les prérequis; (iii) premier travail pratique à distance (Lab1 sur les filtres passifs) avec trois niveaux de difficulté; (iv) leçon sur les filtres actifs (documents en ligne); (v) test formatif; (vi) deuxième et troisième travaux pratiques à distance (Lab2 sur les diagrammes de Bode, Lab3 sur l'analyse des signaux et des spectres); (vii) test final sommatif avec télé-chargement du travail effectué; (viii) enquête de satisfaction.

3.5 Impact sur la motivation des étudiants

Évaluation

Pour évaluer la qualité et l'intérêt d'une activité de laboratoire à distance, une évaluation technique et une évaluation pédagogique doivent être menées. Nous avons conduit quatre sessions de *Laborem* respectivement en 2009 (13 étudiants), 2011 (47 étudiants), 2012 (22 étudiants) et 2013 (25 étudiants). Les deux premières sessions ont eu lieu dans une salle équipée de PC à l'université (accès intranet), tandis que les deux dernières ont été effectuées par chaque étudiant depuis chez lui (accès Internet, éventuellement avec une connexion wifi).

1. voir une vidéo d'exemple en ligne : <https://youtu.be/rRBh0Es001w>

À chaque fois, deux questionnaires anonymes ont été utilisés pour l'enquête : un questionnaire détaillé visant à évaluer leur motivation a priori face à ce type de dispositif et une enquête globale de satisfaction notant les dix principaux aspects rapportés dans le tableau 3.1.

TABLE 3.1 – Réponses des étudiants (notes allant de 0 à 20).

Année Nombre d'étudiants	2009 13	2011 18	2011 29	2012 22	2013 25
Aspect évalué	en salle de classe			à la maison	
Confort de l'interaction	12.8	11.6	13.9	12.3	13
Qualité technique de la plateforme	14.1	12.6	13.7	12.8	13.5
Scénario type jeu	13.9	14.9	13.5	10.4	13.4
Efficacité pédagogique	13.8	13.1	12.9	10.3	12.6
Contrôle à distance des appareils	13	12.7	14.2	11.7	14.1
Absence de contraintes spatio-temporelles	12.5	14.2	13.9	13.1	12.4
Travail collaboratif	12.6	14.3	14.5	13.4	15.2
Autonomie requise	13.8	13.7	13.7	12.3	14.2
Préparation, Documents et Prérequis	10.9	12.6	13.4	14	14.5
Satisfaction globale	12.6	12.5	12.1	10.7	13.3
Note moyenne	13	13.2	13.6	12.1	13.6

Cette évaluation met en évidence les faits suivants. Premièrement, le passage de la salle de classe en 2011 (avec un tuteur) à la maison en 2012 (étudiant seul) a conduit à une forte baisse des notes (étudiant moins confiant, moins motivé). En améliorant l'application en 2013 (principalement par l'utilisation du bras robotique et du Top 10), nous avons significativement augmenté la motivation des étudiants et, par conséquent, la satisfaction, ce qui a conduit à la même note moyenne qu'en 2011. Deuxièmement, l'amélioration chaque année de la qualité de la documentation en ligne engendre une amélioration continue des notes. Enfin, deux aspects sont particulièrement appréciés des étudiants : l'approche d'apprentissage collaborative et l'activité autonome.

La question de l'efficacité pédagogique doit cependant être approfondie avant de tirer une conclusion définitive. Outre ces enquêtes quantitatives, les étudiants ont également eu la possibilité de laisser des commentaires textuels sur l'application. D'après ces commentaires, deux éléments apparaissent comme déterminants : la qualité technique et les prérequis. En effet, des *bugs* ne doivent pas se produire dans l'apprentissage à distance et le travail doit être bien préparé [20] et documenté afin d'avoir un apprentissage efficace.

Bilan du prototype 2014

Comme présenté dans la partie précédente, un prototype a été conçu, déployé et testé auprès de plusieurs promotions d'étudiants. Une vidéo décrivant la plateforme a été présentée à la Conférence des Présidents d'Université (CPU) en 2015². L'évaluation de l'efficacité de cet outil a contribué à nous inciter à travailler sur ce sujet pour l'améliorer.

En effet, certains aspects techniques relatifs à la conception du laboratoire distant étaient très pénalisants. Afin de ne pas démotiver l'étudiant, l'accès web à la plateforme doit être fluide et rapide et ne doit pas nécessiter l'installation d'un logiciel ou *plugin* particulier

2. Vidéo présentée à la CPU en 2015 : <https://www.youtube.com/watch?v=2bsfeJIL5GU&t=5s>

comme cela était le cas sur ce prototype. De plus, afin de diffuser la solution technique développée dans le cadre de ces activités de recherche, il est nécessaire de reconsidérer les développements logiciels et matériels :

- Logiciel : utiliser des outils logiciels libres pour s’affranchir de toute incompatibilité pouvant être liée à une solution propriétaire. Les licences des logiciels libres étant contaminantes nous avons la garantie que les développements issus de l’outil logiciel développé resteront libres.
- Matériel : proposer une plateforme matérielle robuste et fournir à chacun le mode d’emploi technique pour le déploiement de l’instrumentation nécessaire à ce type de travaux pratiques. De plus, pour rester dans la philosophie de la licence logicielle libre, ces développements techniques seront également sous licence libre.

Dans les sections 3.6 et 6 ces deux perspectives sont présentées en détail.

3.6 Plateforme **Laborem** depuis 2017

3.6.1 Contexte

Le prototype décrit dans la section précédente nous a encouragé à concevoir un système ouvert et libre d’utilisation. Ainsi nous avons opté pour une technologie open-source tant du point de vue matériel que du point de vue logiciel.

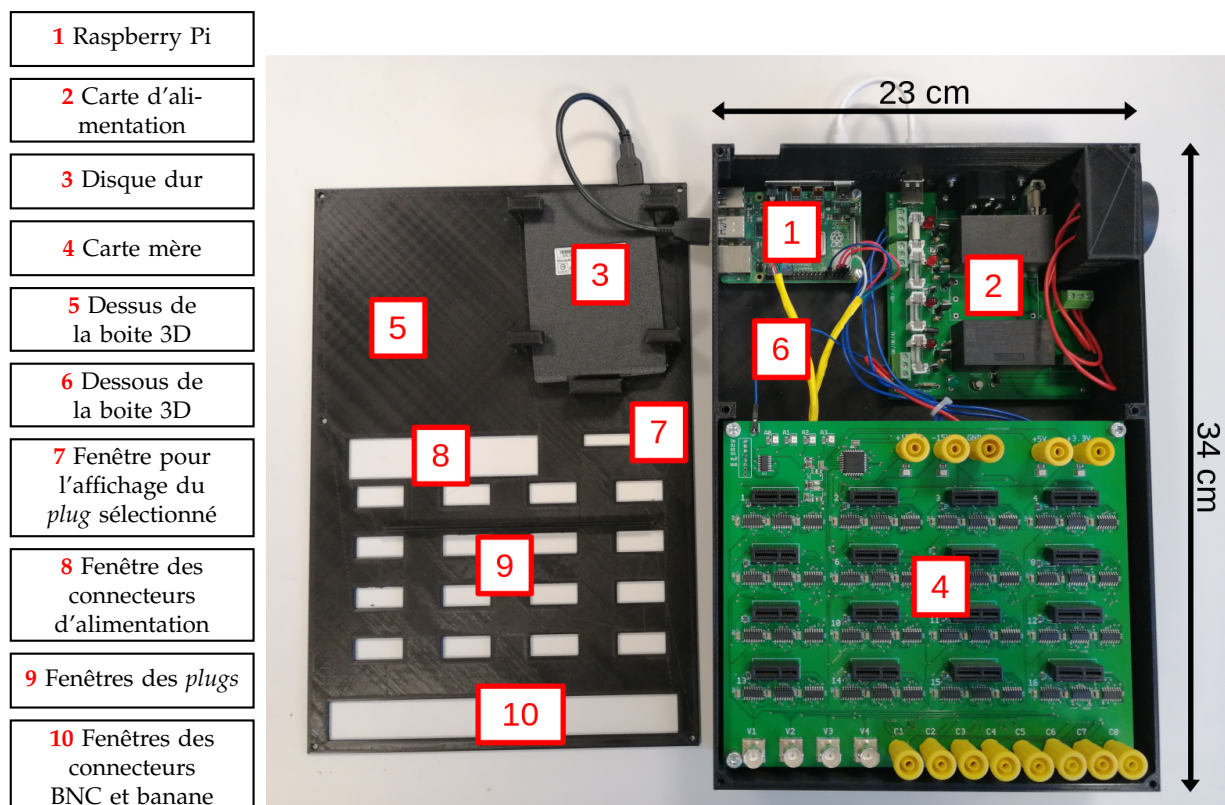
L’Open Source Hardware Association (OSHA) a défini [21] le matériel open source (OSHW) comme des machines, dispositifs ou autres objets physiques dont la conception a été rendue publique afin que quiconque puisse fabriquer, modifier, distribuer et utiliser ces objets. Dans tous les laboratoires à distance et expériences à distance répertoriés dans [22], il n’y en a qu’un petit nombre utilisant des logiciels open source (voir tableau 3.2). Cependant, il a été observé une tendance à utiliser du matériel existant à faible coût ou même des logiciels open source afin d’améliorer la standardisation et la simplicité d’utilisation. De nombreux laboratoires d’enseignement à distance utilisent des ordinateurs monocartes (SBC), tels que le Raspberry Pi, pour contrôler leur équipement [23, 24, 25, 26]. Pour fabriquer des circuits électriques et connecter plusieurs instruments, certains utilisent encore des plaques de montage (breadboards) [25], comme nous l’avons fait avant 2017, tandis que d’autres conçoivent leurs propres circuits imprimés (PCB) [26, 27]. D’autres laboratoires utilisent des microcontrôleurs comme Arduino, qui peuvent être programmés pour acquérir et générer des signaux électriques afin de réaliser une grande variété de tâches, telles que l’éclairage, le chauffage, le contrôle de robots, l’informatique embarquée, etc. [26, 28, 25, 27, 29, 30].

Le projet **Laborem** développé à l’IUT de Bayonne vise à offrir des travaux pratiques en électronique à distance via une plateforme logicielle et matérielle peu coûteuse, simple à déployer, open source et évolutive. La première version de **Laborem** était basée sur du matériel et des logiciels propriétaires. Des solutions de la société National Instruments (NI), y compris le logiciel *LabVIEW* [31] et le *Protoboard Elvis* [32], étaient utilisées. Cette solution était coûteuse et complexe à reproduire. Cependant, elle nous a permis de tester notre concept de laboratoire à distance dans nos cours [33, 34].

Ensuite, nous avons conçu la *Laborem Box* qui se compose d’un boîtier imprimable en 3D, d’une carte d’alimentation, de plusieurs cartes électroniques amovibles appelées *plugs* et d’une carte mère pouvant être connectée à divers instruments. Les *plugs* sont des circuits électroniques faciles à fabriquer et contenant le montage électronique à étudier. Un emplacement est également prévu pour un SBC et un disque dur optionnel (voir figure 3.7).

TABLE 3.2 – Comparaison des développements des laboratoires à distance.

Laboratoire à distance	Logiciel open source	Matériel open source
UNILabs	Oui	Non
WebLab-Deusto LabsLand	Oui	Non
RexLab	Oui	Non
ISES RemLabNet	Non	Non
VirtualRemoteLab	Non	Non
GOLDi	Non	Non
OE@FEUP HTML/LabVIEW	Non	Non
e-lab IST	Non	Non
Stanford iLABS	Non	Non
iLAB LabShare	Non	Non
FarLabs	Non	Non
Laborem	Oui	Oui

FIGURE 3.7 – Les composants de la *Laborem Box*.

3.6.2 Description du matériel

Aperçu

L'architecture de [Laborem](#) est centrée sur la *Laborem Box* (figure 3.8). Une photographie de la plateforme est disponible en figure 3.9.

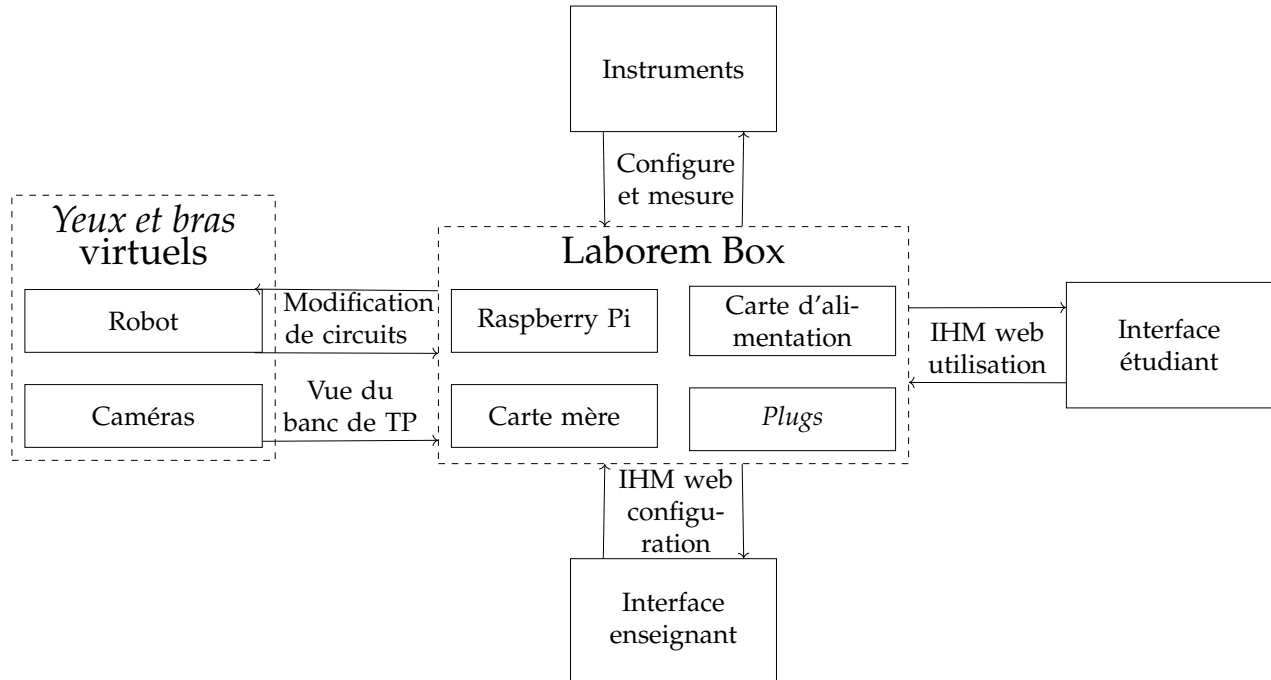


FIGURE 3.8 – Vue d'ensemble de l'architecture du système [Laborem](#).

La *Laborem Box* est basée sur un serveur, qui dans ce cas est un Raspberry Pi, qui héberge l'interface homme-machine (IHM) accessible via une page web par les étudiants et les enseignants. L'IHM est accessible depuis n'importe quel appareil (ordinateur, tablette ou smartphone) et tout système d'exploitation utilisant un navigateur web moderne.

La carte d'alimentation est conçue pour fournir toutes les références de tension principalement pour les circuits intégrés de la plateforme (commutateurs, multiplexeur).

La carte mère sélectionne le dispositif sous test (**DUT**) approprié en connectant toutes ses entrées et sorties aux équipements du laboratoire.

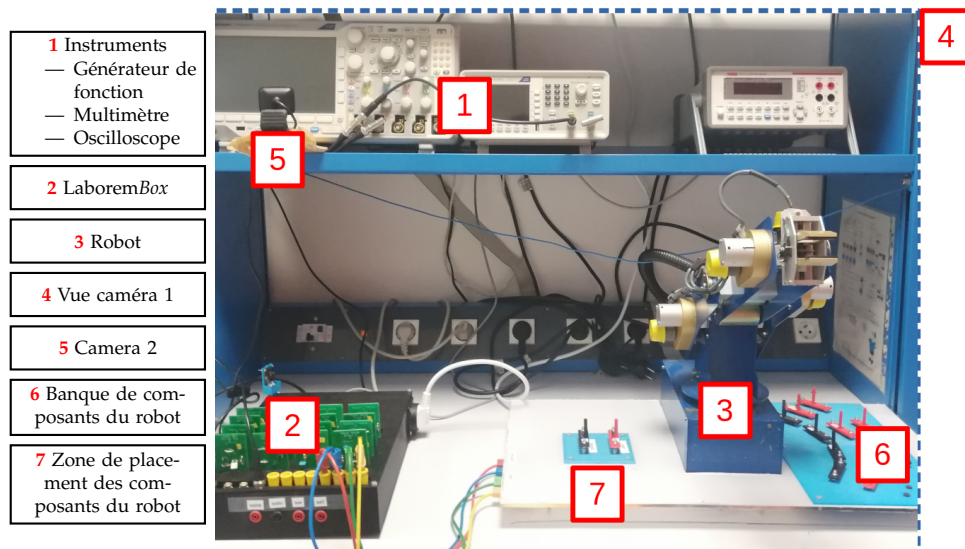
Les *plugs* sont conçus pour offrir un système robuste et facile à changer qui permet de construire une grande variété de circuits électroniques.

Le bras robotisé et les caméras utilisés sur le prototype 2009-2014 (voir section 3.4) ont été conservés dans cette nouvelle plateforme.

La particularité de la carte est de permettre simplement aux enseignants de :

- Proposer leurs travaux pratiques électroniques aux étudiants via un accès à distance et un panneau d'administration simple.
- Choisir les instruments nécessaires pour le travail pratique.
- Connecter des instruments spécifiques à l'aide de connecteurs BNC et Banana.
- Créer les *plugs* nécessaires à l'étude d'un ensemble de circuits électriques.
- Changer rapidement les *plugs* pour passer facilement à d'autres travaux pratiques.

Les instruments actuellement connectés à la *Laborem Box* utilisent les commandes *Standard Commands for Programmable Instruments* (SCPI) et l'architecture *Virtual Instrument Software Architecture* ([VISA](#)) (gérés par la [fondation IVI](#)). Nous connectons les instruments via GPIB ou USB au Raspberry Pi. Tout instrument utilisant un protocole géré par [PyScada](#) peut

FIGURE 3.9 – Aperçu du banc d’essai *Laborem*.

être utilisé (par exemple : [VISA](#), [Modbus](#), [I2C-SMBus](#), [OneWire](#), [BACnet](#), [OPC-UA](#), [webservice](#), [Serial](#)). Cette liste est mise à jour au fil des développements.

La carte mère

Il était nécessaire de concevoir un PCB appelé carte mère afin de :

- connecter tous les éléments électroniques de *Laborem*,
- fournir des alimentations et tous les signaux utiles (typiquement les entrées/sorties) sur chaque *plug*,
- concevoir un système robuste et facile pour changer rapidement les *plugs* (slot PCI Express).

La carte mère dispose de 4 connecteurs d’entrée/sortie à usage général ([GPIO](#)) qui permettent de sélectionner un *plug* spécifique à étudier parmi les 16 *plugs* connectés. 12 entrées/sorties (I/O) (4 BNC (V1 à V4) et 8 connecteurs *banana* (C1 à C8)) sont également disponibles pour connecter facilement d’autres signaux d’instruments périphériques tels qu’un oscilloscope, un multimètre, un générateur de fonctions, un bras robotique ou des relais.

Les plugs

Chaque *plug* contient un [DUT](#). Les *plugs* actuellement disponibles permettent l’étude de 4 filtres passifs (filtre passe-bas, passe-haut, filtre passe-bande de Wien et filtre double T) et 4 filtres actifs (filtre passe-bas, passe-haut et passe-bande de Sallen-Key et passe-bande du second ordre). Chaque *plug* est dédoublé afin de fournir un montage complet et un montage à compléter avec 2 composants à ajouter via le bras robotisé.

Un exemple de montage présentant un filtre passe-bande actif complet est donné dans la figure [3.10](#).

Carte d’alimentation

La carte d’alimentation qui est alimentée par une prise principale (220V AC) fournit une tension DC au Raspberry Pi (5V, 3A) et des tensions DC (+/-15V, 5V, 3.3V) à la carte mère et aux *plugs* connectés. De plus, la carte d’alimentation est équipée d’un relais qui permet de

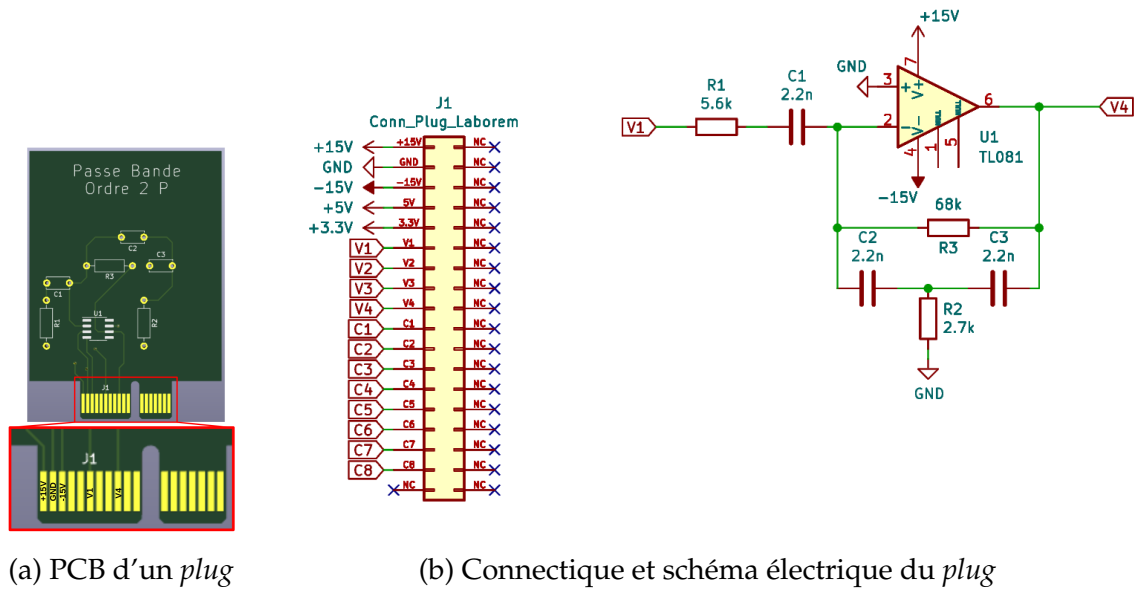


FIGURE 3.10 – Filtre passe-bande pré-câblé d'ordre 2

couper l'alimentation générale d'une multiprise où sont connectés les instruments externes (oscilloscope, multimètre, générateur de fonctions, robot, éclairage) afin d'économiser de l'énergie lorsque la plateforme n'est pas utilisée par un étudiant.

3.6.3 Partie logicielle

Depuis 2017, en tenant compte du retour d'expérience des étudiants nous avons choisi de changer le logiciel permettant de gérer la plateforme [Laborem](#) pour assurer une compatibilité optimale côté client. Un logiciel nommé [PyScada](#), pour Python et [SCADA](#), est actuellement utilisé. Le but de ce logiciel est de recevoir des données provenant de différents capteurs ou instruments et de les contrôler via une simple page web. Ce logiciel sera présenté plus en détails dans le chapitre 6. Un [SBC](#) tel qu'un Raspberry Pi ou tout ordinateur avec une carte [GPIO](#) supplémentaire peut être utilisé.

3.7 Synthèse

Depuis ma prise de fonction ce projet a profondément évolué afin de s'adapter au mieux aux besoins de l'étudiant. Les travaux de recherche menés en collaboration avec mon collègue Franck Luthon du laboratoire LIUPPA de l'[UPPA](#), ont permis de valider un prototype (section 3.4) et de procéder à son transfert technologique ayant abouti à la conception de la plateforme actuelle (voir section 3.6 et 6).

Parmi les points positifs de l'enseignement à distance nous pouvons citer les éléments suivants :

- l'approche de type jeu a été expérimentée et a donné de bons résultats pour motiver les étudiants à répéter les expériences,
- l'accès au laboratoire en dehors des créneaux de travaux pratiques inscrits à leur emploi du temps fournit à l'étudiant un nouvel outil pédagogique pour ses révisions,
- la réduction des coûts liés aux travaux pratiques.

En revanche, il est illusoire de penser que l'enseignement à distance peut pleinement remplacer l'enseignement traditionnel. En effet, lors de nos expériences et à travers les périodes de confinement liées au COVID, nous avons relevé plusieurs aspects négatifs :

- les bugs et dysfonctionnements informatiques dus à des causes liées au côté client entraînent une démotivation des étudiants,
- l'apprentissage isolé peut ne pas correspondre à certains étudiants qui ont le besoin d'interagir avec un professeur ou un camarade de promotion.

De plus, des travaux présentés en section 4.2 pour améliorer le retour vidéo ont été menés en utilisant un drone *low cost*. Plusieurs enquêtes et expérimentations ont été conduites pour améliorer la plateforme et tenir compte du retour des usagers et de notre veille technologique.

Outre les résultats obtenus dans mes travaux de recherche, le projet [Laborem](#) a permis :

- d'obtenir en 2023 un financement issu d'un appel à projet **ADESFA** (Appui au développement de l'enseignement supérieur français en Afrique) géré par le **MEAE** (Ministère de l'Europe et des Affaires Étrangères) dans le cadre de *France Éducation International* pour une collaboration avec l'IUT de Thiès au Sénégal et dont l'objectif était d'ouvrir une licence professionnelle. Cette licence a accueilli ses premiers étudiants en avril 2025.
- depuis 2017, de développer un système innovant donnant des perspectives intéressantes pour d'autres applicatifs afin de contribuer à résoudre des problématiques liées à l'optimisation des consommations énergétiques (naissance du projet [Laborenergie](#) en 2019).
- la sélection à l'appel à projet **innovation pédagogique-E2S** pour concevoir la nouvelle plateforme open-source en finançant un ingénieur sur l'année 2018.
- plusieurs financements de thèses dont j'ai assuré la co-direction et ayant rendu tous ces travaux possibles. En 2019, un financement pour la bourse de thèse de Camille Lavayssière [35] (financement doctoral [UPPA E2S](#) et communauté d'agglomération du pays basque). En 2015, la **co-direction de la thèse** de Fawzi Khattar [36].
- en 2018, d'assurer un rôle d'expert dans le projet MutPed en partenariat avec l'AUF (Agence Universitaire pour la Francophonie) et l'Université de Ouagadougou (Burkina Faso).

Les travaux liés à la plateforme [Laborem](#) que nous avons développée à l'IUT de Bayonne ont conduit à diverses publications dans des journaux scientifiques [33, 37, 34, 38], dans des conférences internationales [3, 39, 40, 41, 42, 43] et dans des conférences nationales [44, 45, 46, 47].

Références personnelles

- [3] F. LUTHON et B. LARROQUE. « Remote Laboratory for Game-Based Distance Learning in Electronics ». In : *4th Int. Conf. on Electronics, Communications and Networks (CECNet 2014)*. Beijing, China, déc. 2014.
- [33] F. LUTHON et B. LARROQUE. « LaboREM—A Remote Laboratory for Game-Like Training in Electronics ». In : *IEEE Transactions on Learning Technologies* 8.3 (1^{er} juill. 2015), p. 311-321. ISSN : 1939-1382. DOI : [10.1109/TLT.2014.2386337](https://doi.org/10.1109/TLT.2014.2386337).
- [34] B. LETOWSKI, C. LAVAYSSIÈRE, M. SCHRÖDER, B. LARROQUE et F. LUTHON. « A Fully Open Source Remote Laboratory for Practical Learning ». In : *Electronics (Switzerland, MDPI)* 9.1832 (2020), p. 1-16. DOI : [DOI:10.3390/electronics9111832](https://doi.org/10.3390/electronics9111832).
- [37] C. LAVAYSSIÈRE, B. LETOWSKI, B. LARROQUE et F. LUTHON. « LaboREM - A network of open source remote laboratories for learning. » In : *IJAECs* 5.10 (2018), p. 41-45. DOI : [IJAECs-IRAJ-DOI-13876](https://doi.org/10.1109/IJAECs-IRAJ-DOI-13876).
- [38] C. LAVAYSSIÈRE, F. LUTHON et B. LARROQUE. « Laborem Box : a scalable and open source platform to design remote lab experiments in electronics ». In : *HardwareX (Elsevier)* 1 (2022), p. 1-21. DOI : <https://doi.org/10.1016/j.ohx.2022.e00301>.
- [39] F. LUTHON et B. LARROQUE. « Real labworks in electronics : Yes! ... But remotely controlled ». In : *8th Int. Conf. of Education, Research and Innovation (ICERI 2015)*. Seville, Spain, nov. 2015.
- [40] C. LAVAYSSIÈRE, B. LETOWSKI, B. LARROQUE et F. LUTHON. « LaboREM - A network of open source remote laboratories for learning ». In : *405th Int. Academic Conf. on Engineering, Technology and Innovations (IACETI 2018)*. Santiago, Chile, juill. 2018.
- [41] C. LAVAYSSIÈRE, B. LETOWSKI, B. LARROQUE et F. LUTHON. « Easy applied sciences learning through open source remote laboratory ». In : *11th annual Int. Conf. of Education, Research and Innovation (ICERI 2018)*. Seville, Spain, nov. 2018.
- [42] B. LETOWSKI, C. LAVAYSSIÈRE, B. LARROQUE et F. LUTHON. « An open source remote laboratory network based on a ready to use solution : Laborem ». In : *ICERI2019 Proceedings* (2019), p. 5726-5731. ISSN : 2340-1095.
- [43] C. LAVAYSSIÈRE, B. LARROQUE et F. LUTHON. « Analysis of Students' Behavior Regarding the Use of Open Source Remote Laboratories ». In : *13th annual Int. Conf. on Education and New Learning Technologies (EDULEARN 21)*. Spain, juill. 2021.
- [44] B. LARROQUE et F. LUTHON. « LaboREM : de vrais TP d'électronique ... Oui mais à distance ». In : *Congrès National de la Recherche des IUT (CNRIUT'2016)*. Nantes, France, juin 2016.
- [45] B. LARROQUE et F. LUTHON. « LaboREM : travaux pratiques d'électronique à distance ». In : *EIDOS64, le forum des pratiques numériques pour l'éducation*. Mourenx, France, jan. 2014.
- [46] B. LARROQUE et F. LUTHON. « LaboREM : retour sur 4 années d'expérimentation ». In : *Journées IUTICE Edition 2013*. Anglet, France, sept. 2013.
- [47] E. A. PETRE, F. LUTHON, B. LARROQUE, P. DIBON et J. FITON. « LaboREM : laboratoire flexible pour instrumentation déportée et travaux pratiques à distance ». In : *7eme REAL Rencontre Europe Amérique Latine*. Colombie, nov. 2010.

Références

- [1] M.-D. STERIU et F. LUTHON. « Open Architecture for Signal Processing Lab Distance Learning ». In : *2006 IEEE 12th Digital Signal Processing Workshop and 4th IEEE Signal Processing Education Workshop*. 2006, p. 305-310. DOI : [10.1109/DSPWS.2006.265396](https://doi.org/10.1109/DSPWS.2006.265396).
- [2] F. LUTHON, A. PETRE, M.-D. STERIU et A. BESLEAGA. « LaboRem : open lab for remote work ». In : *2009 3rd International Conference on Signals, Circuits and Systems (SCS)*. 2009, p. 1-6. DOI : [10.1109/ICSCS.2009.5412343](https://doi.org/10.1109/ICSCS.2009.5412343).
- [4] I. GUSTAVSSON et al. « On Objectives of Instructional Laboratories, Individual Assessment, and Use of Collaborative Remote Laboratories ». In : *IEEE Trans. on Learning Technologies* 2.4 (oct. 2009), p. 263-274.
- [5] M. TAWFIK et al. « Virtual Instrument Systems in Reality (VISIR) for Remote Wiring and Measurement of Electronic Circuits on Breadboard ». In : *IEEE Trans. on Learning Technologies* 6.1 (jan. 2013), p. 60-72.
- [6] I. VERGINIS, A. GOGOULOU, E. GOULI, M. BOUBOUKA et M. GRIGORIADOU. « Enhancing Learning in Introductory Computer Science Courses Through SCALE : An Empirical Study ». In : *IEEE Trans. on Education* 54.1 (fév. 2011), p. 1-13.
- [7] M. E. AUER et C. GRAVIER. « Guest Editorial : The Many Facets of Remote Laboratories in Online Engineering Education ». In : *IEEE Trans. on Learning Technologies* 2.4 (oct. 2009), p. 260-262.
- [8] T. WOLF. « Assessing Student Learning in a Virtual Laboratory Environment ». In : *IEEE Trans. on Education* 53.2 (mai 2010), p. 216-222.
- [9] J. V. NICKERSON, J. E. CORTER, S. K. ESCHÉ et C. CHASSAPIS. « A model for evaluating the effectiveness of remote engineering laboratories and simulations in education ». In : *Computers and Education* 49.3 (2007), p. 708-725. ISSN : 0360-1315. DOI : <https://doi.org/10.1016/j.compedu.2005.11.019>.
- [10] J. GARCIA-ZUBIA, P. ORDUNA, D. LOPEZ-DE-IPINA et G. R. ALVES. « Addressing Software Impact in the Design of Remote Laboratories ». In : *IEEE Trans. on Industrial Electronics* 56.12 (déc. 2009), p. 4757-4766.
- [11] J. A. MENDEZ et E. J. GONZALEZ. « Implementing Motivational Features in Reactive Blended Learning : Application to an Introductory Control Engineering Course ». In : *IEEE Trans. on Education* 54.4 (nov. 2011), p. 619-627.
- [12] N. KOSTARAS, M. XENOS et A. N. SKODRAS. « Evaluating Usability in a Distance Digital Systems Laboratory Class ». In : *IEEE Transactions on Education* 54.2 (mai 2011), p. 308-313.
- [13] S. RAPUANO et F. ZOINO. « A Learning Management System Including Laboratory Experiments on Measurement Instrumentation ». In : *IEEE Trans. on Instrumentation and Measurement* 55.5 (oct. 2006), p. 1757-1766.
- [14] M. A. TRENAS, J. RAMOS, E. D. GUTIERREZ, S. ROMERO et F. CORBERA. « Use of a New Moodle Module for Improving the Teaching of a Basic Course on Computer Architecture ». In : *IEEE Trans. on Education* 54.2 (mai 2011), p. 222-228.
- [15] M. LLAMAS-NISTAL, M. CAEIRO-RODRIGUEZ et M. CASTRO. « Use of E-learning Functionalities and Standards : The Spanish Case ». In : *IEEE Trans. on Education* 54.4 (nov. 2011), p. 540-549.

- [16] T. AUGUSTIN, C. HOCKEMEYER, M. D. KICKMEIER-RUST et D. ALBERT. « Individualized Skill Assessment in Digital Learning Games : Basic Definitions and Mathematical Formalism ». In : *IEEE Trans. on Learning Technologies* 4.2 (avr. 2011), p. 138-148.
- [17] J. GARCIA-ZUBIA et G. R. ALVES, éd. *Using Remote Labs in Education : two little ducks in remote experimentation*. Bilbao, Spain : University of Deusto, 2011.
- [18] M. MUNÓZ-ORGANERO, P. MUNÓZ-MERINO et C. D. KLOOS. « Student Behaviour and Interaction Patterns with an LMS as Motivation Predictors in E-Learning Settings ». In : *IEEE Trans. on Education* 53.3 (août 2010), p. 463-470.
- [19] R. GARRIS, R. AHLERS et J. E. DRISKELL. « Games, Motivation, and Learning : A Research and Practice Model ». In : *Simulation & Gaming* 33.4 (déc. 2002), p. 441-467.
- [20] D. A. O'LEARY, J. SHATTUCK et J. KUBBY. « An Online, Interactive Renewable Energy Laboratory ». In : *IEEE Trans. on Education* 55.4 (nov. 2012), p. 559-565.
- [21] *Definition (English)*. Open Source Hardware Association. URL : <https://www.oshwa.org/definition/> (visité le 12/01/2022).
- [22] J. GARCIA-ZUBIA. *Empowering STEM Education with Technology : Remote Laboratories*. 1^{er} fév. 2021. ISBN : 978-1-78634-942-2. DOI : [10.1142/q0277](https://doi.org/10.1142/q0277).
- [23] J. BERMÚDEZ-ORTEGA, E. BESADA, J. LOPEZ-OROZCO, J. BONACHE-SECO et J. de la CRUZ. « Remote Web-based Control Laboratory for Mobile Devices Based on EJS, Raspberry Pi and Node.js ». In : *IFAC-Papers On Line* 48 (31 déc. 2015), p. 158-163. DOI : [10.1016/j.ifacol.2015.11.230](https://doi.org/10.1016/j.ifacol.2015.11.230).
- [24] M. KALUZ, J. GARCIA-ZUBIA, M. FIKAR et L. CIRKA. « A Flexible and Configurable Architecture for Automatic Control Remote Laboratories ». In : *IEEE Transactions on Learning Technologies* 8 (1^{er} juill. 2015), p. 299-310. ISSN : 1939-1382. DOI : [10.1109/TLT.2015.2389251](https://doi.org/10.1109/TLT.2015.2389251).
- [25] R. M. RECK et R. S. SREENIVAS. « Developing an Affordable and Portable Control Systems Laboratory Kit with a Raspberry Pi ». In : *Electronics* 5.3 (sept. 2016), p. 36. DOI : [10.3390/electronics5030036](https://doi.org/10.3390/electronics5030036).
- [26] J.-M. GUERRERO-RODRÍGUEZ, C. COBOS SÁNCHEZ, Á. QUIRÓS-OLOZÁBAL et J. A. LEÑERO-BARDALLO. « Emulation of Circuits under Test Using Low-Cost Embedded Platforms ». In : *Electronics* 10.16 (jan. 2021), p. 1990. DOI : [10.3390/electronics10161990](https://doi.org/10.3390/electronics10161990).
- [27] A. VILLAR-MARTÍNEZ, L. RODRÍGUEZ-GIL, I. ANGULO, P. ORDUÑA, J. GARCÍA-ZUBÍA et D. LÓPEZ-DE-IPÍÑA. « Improving the Scalability and Replicability of Embedded Systems Remote Laboratories Through a Cost-Effective Architecture ». In : *IEEE Access* 7 (2019), p. 164164-164185. ISSN : 2169-3536. DOI : [10.1109/ACCESS.2019.2952321](https://doi.org/10.1109/ACCESS.2019.2952321).
- [28] M. SUKOP et al. « Remote Controlling of Automated Systems Based on Client – Server Architecture ». In : *Journal of Automation and Control* 5.2 (11 déc. 2017), p. 69-72. ISSN : 2372-3033. DOI : [10.12691/automation-5-2-8](https://doi.org/10.12691/automation-5-2-8).
- [29] N. WANG, X. CHEN, Q. LAN, G. SONG, H. R. PARSAEI et S.-C. HO. « A Novel Wiki-Based Remote Laboratory Platform for Engineering Education ». In : *IEEE Transactions on Learning Technologies* 10.3 (juill. 2017), p. 331-341. ISSN : 1939-1382. DOI : [10.1109/TLT.2016.2593461](https://doi.org/10.1109/TLT.2016.2593461).
- [30] L. Q. TRAN, P. RADCLIFFE et L. WANG. « A Low Budget Take-Home Control Engineering Laboratory for Undergraduate ». In : *The International Journal of Electrical Engineering & Education* (1^{er} juin 2019). ISSN : 0020-7209. DOI : [10.1177/0020720919852784](https://doi.org/10.1177/0020720919852784).
- [31] *What Is LabVIEW?* URL : <https://www.ni.com/en-gb/shop/labview.html> (visité le 09/09/2021).

- [32] NI Elvis. URL : <https://www.ni.com/fr-fr/shop/hardware/products/ni-elvis.html> (visité le 12/10/2021).
- [35] C. LAVAYSSIERE. « Supervision et instrumentation à distance, libre et interopérable, du capteur à l'utilisateur. » 2022PAUU3041. Thèse de doct. 2022.
- [36] F. KHATTAR. « Enriching Remote Labs with Computer Vision and Drones ». Thèse de doct. Anglet, France : University of Pau & Pays Adour, 2018.

Sommaire

4.1	Introduction	47
4.2	Vision par drone dans un laboratoire distant	48
4.2.1	Contexte	48
4.2.2	Choix de développement	48
4.2.3	Contrôle du quadricoptère	49
4.2.4	Estimation de la pose Objet-Caméra	50
4.2.5	Approche proposée	51
4.2.6	Réglage des paramètres	52
4.2.7	Estimation de la pose visage-caméra	52
4.2.8	Scénario type	56
4.2.9	Scénario de suivi de visage	58
4.2.10	Conclusion	58
4.3	Suivi de civelles	60
4.3.1	Contexte	60
4.3.2	Le dispositif expérimental	60
4.3.3	Description de l'algorithme de traitement des vidéos	62
4.3.4	Synthèse des résultats	65
4.3.5	Conclusion	66
	Références personnelles	68
	Références	68

4.1 Introduction

Au cours de mes recherches j'ai pu mener des travaux relatifs au traitement d'images et à la vision par ordinateur. En effet, dans le cadre du projet Laborem il était intéressant d'étudier l'amélioration du retour vidéo du laboratoire distant présenté en section 3, nous avons choisi d'implémenter un drone. Ces travaux ont eu lieu dans le cadre de la thèse [1] de Fawzi Khattar qui a débuté le 01/10/2015 et a été soutenue le 13/12/2018. J'ai pu assurer la co-direction de cette thèse en co-tutelle avec Fadi Dornaika de l'UPV (University of the Basque Country) et Franck Luthon.

Le retour vidéo doit permettre d'explorer librement les équipements et d'interagir avec un enseignant ou un technicien qui serait présent dans le laboratoire. Ainsi il est nécessaire

de travailler sur la localisation du drone dans son espace (grâce au retour video notamment) et sur la reconnaissance de formes (équipements et environnement 3D) et de visages (enseignant). Les travaux développés sont présentés en section 4.2.

Sur un tout autre sujet nous avons été contactés par une collègue de l'UMR Ecobiop qui avait des besoins en vision par ordinateur pour ses travaux de recherches. Les recherches conduites au sein de l'UMR ECOBIOP (Ecologie Comportementale et Biologie des Populations de Poissons) visent à étudier le comportement des poissons et son rôle sur le fonctionnement et l'évolution des populations naturelles. Afin de travailler sur l'analyse de vidéos filmant des civelles dans un contexte expérimental la vision par ordinateur permet de fournir une synthèse des mouvements de ces poissons et ainsi faciliter le travail des ingénieurs de cette UMR qui effectuaient toutes ces analyses manuellement. Des marquages couleurs facilitent l'identification et le suivi de ces civelles pour individualiser les données acquises dans chaque traitement des vidéos. Ces travaux sont décrits dans la section 4.3.

4.2 Vision par drone dans un laboratoire distant

4.2.1 Contexte

Afin d'améliorer le retour vidéo du laboratoire distant présenté en section 3, nous avons choisi d'implémenter un drone équipé d'une caméra, pour :

- explorer avec plus de flexibilité les équipements du laboratoire distant,
- interagir avec un enseignant ou un technicien dans le cas où celui-ci serait présent et disponible dans les locaux du laboratoire à distance.

Afin d'atteindre ces deux objectifs nous avons développé plusieurs travaux dont les principales contributions peuvent être résumées comme suit :

- un système de localisation basé sur deux composants complémentaires pour l'inspection d'objet,
- la mise en œuvre d'un système de contrôle entièrement autonome d'un drone à bas coût pour l'inspection visuelle des instruments et la communication étudiant - enseignant dans les laboratoires à distance.

4.2.2 Choix de développement

L'objectif est de pouvoir contrôler un drone et naviguer de manière autonome dans un environnement intérieur en 3D pour rechercher les faces-avant des instruments ou un visage humain. Une fois la mission terminée, le drone doit être capable de retourner à son point de départ et d'atterrir sur une plateforme pour la recharge automatique de ses batteries. Pour accomplir cette tâche, une estimation continue de la position 3D du drone doit être disponible ainsi qu'un système de contrôle qui calcule les commandes appropriées à envoyer au drone pour le faire voler d'une position 3D initiale à une position 3D souhaitée.

De nombreux capteurs peuvent être utilisés pour l'estimation de la position 3D d'un quadricoptère. Pour les environnements extérieurs, les capteurs [GPS](#) (Global Positioning System) sont la meilleure solution pour obtenir une localisation approximative d'un quadricoptère. Dans [2], les auteurs proposent un système [SLAM](#) visuel (Simultaneous Localization And Mapping) qui fusionne les données [GPS](#) avec des estimations visuelles lors de l'initialisation afin d'estimer la pose du drone.

Pour les environnements intérieurs ou pour les environnements où le [GPS](#) est indisponible, un système de localisation doit s'appuyer sur d'autres sources d'informations telles que des caméras (monoculaire, stéréo ou de profondeur), des centrales inertielles, des LIDAR (Light Detection and Ranging) ou d'autres capteurs complémentaires. Les capteurs

peuvent être embarqués sur le drone ou placés dans l'environnement. Nous avons choisi d'utiliser uniquement les caméras monoculaires du drone qui offrent un bon compromis entre le poids, la consommation et les informations qu'elles peuvent fournir. Bien que les algorithmes **SLAM** monoculaires ne soient pas suffisants pour une localisation absolue en raison du problème d'ambiguïté d'échelle découlant de la projection du monde 3D en une image 2D, l'ajout d'informations supplémentaires provenant d'autres capteurs ou de connaissances sur les objets disponibles dans l'environnement peut compenser cela.

Lors de nos développements, nous nous appuyons sur le système présenté dans [3], pour la localisation et le contrôle d'un drone à bas coût (AR Drone 2.0) dans un environnement inconnu. Le système est basé sur la fusion des estimations de pose de **PTAM** (Parallel Tracking And Mapping) [4] couplées aux mesures de capteurs dans un filtre de *Kalman* pour la localisation. Le contrôle utilise des boucles de rétroaction traditionnelles à 4 niveaux avec des contrôleurs PID. Étant donné que **PTAM** est un algorithme **SLAM** monoculaire, et afin de permettre une navigation absolue dans l'environnement, un algorithme de maximum de vraisemblance utilise des mesures à ultrasons en plus de **PTAM** pour récupérer l'échelle de la carte lors d'une étape d'initialisation.

De plus, pour pouvoir contrôler le drone afin de centrer le visage d'un enseignant dans l'image, la position du drone par rapport au visage de l'enseignant doit être estimée. À cette fin, nous utilisons le modèle déformable 3D Candide du visage et l'ajustons à l'image en utilisant des points de repère faciaux extraits du visage à l'aide de [5].

4.2.3 Contrôle du quadricoptère

Le drone utilisé dans ce travail est le AR Drone 2.0 (voir figure 4.1).

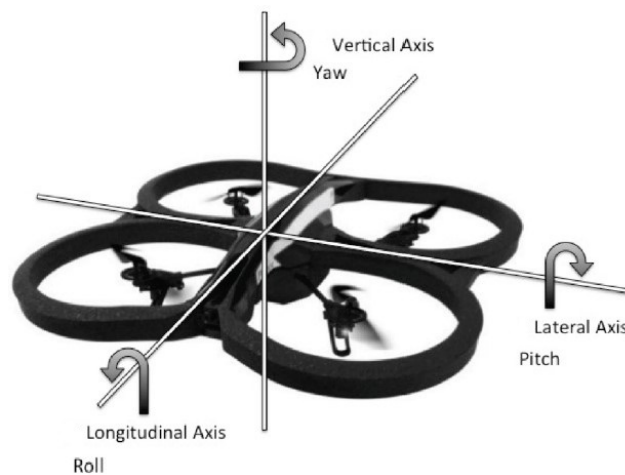


FIGURE 4.1 – AR Drone 2.0 avec système référentiel attaché et conventions d'angles (roulis, lacet et tangage) [6].

Pour contrôler la position et l'orientation 3D du quadricoptère, un contrôle en boucle fermée est utilisé, prenant comme retour d'information le flux vidéo et les données des capteurs du drone, comme montré dans la figure 4.2.

Si l'objectif est l'inspection d'objet, la pose du drone est estimée en utilisant l'un des deux blocs ((a) ou (b) dans la figure 4.2) en fonction de la distance entre la caméra et l'objet d'intérêt. **PTAM** est utilisé dans le cas normal lorsque le drone explore l'environnement et est éloigné de l'objet. Si le drone est proche de l'objet, un système de localisation basé sur la transformation homographique, comme expliqué dans la section suivante, est utilisé à la place.

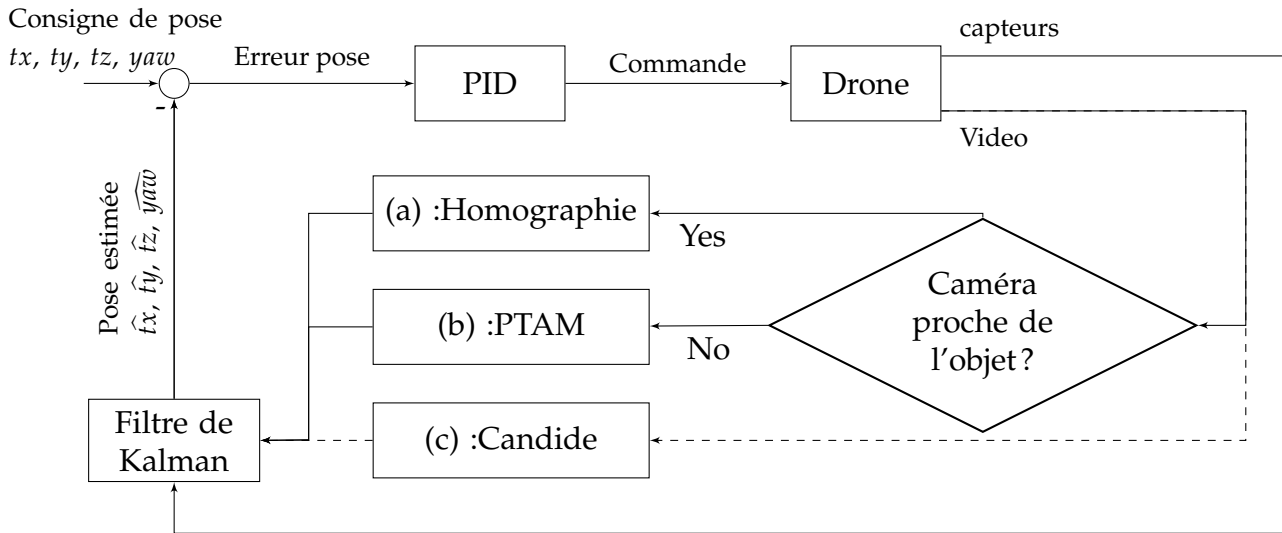


FIGURE 4.2 – Boucle de controle.

Si l'objectif est de contrôler le drone pour maintenir une position relative par rapport à un visage humain, des données issues de l'algorithme présenté dans la section 4.2.7 sont utilisées dans la rétroaction pour la boucle de contrôle (ligne en pointillés dans la figure 4.2). Les degrés de liberté du drone contrôlés correspondent au vecteur de translation 3D (tx , ty , tz) et à l'angle de lacet (yaw). Chaque degré est piloté par un système de contrôle en boucle fermée avec un régulateur PID traditionnel.

4.2.4 Estimation de la pose Objet-Caméra

Une solution en temps réel et sans marqueur Les objets plans sont un type d'objets bien défini, largement disponibles dans les environnements créés par l'homme. Incorporer l'information selon laquelle l'objet d'intérêt est plan est d'un grand bénéfice pour l'estimation de la pose objet-caméra. La matrice d'homographie est une matrice qui relie les points 3D situés sur un plan à leurs projections 2D. Étant donné cette transformation, on peut directement calculer la matrice de rotation et la matrice de translation comme fait dans [7]. Pour estimer l'homographie qui ajuste un plan sur un autre plan par le biais de projections perspectives, plusieurs méthodes peuvent être utilisées. Ces méthodes sont généralement classées en méthodes locales (basées sur les caractéristiques) et méthodes globales (sans caractéristiques).

Étant donné une image de modèle de l'objet plan, les méthodes locales extraient des points clés locaux et attribuent un descripteur à chacun d'eux, à la fois dans l'image modèle et dans l'image actuelle. Après cette étape, les points clés (au moins quatre points clés) dans les deux images sont appariés selon une métrique de similarité effectuée sur les descripteurs. Étant donné les correspondances de points, la matrice d'homographie est estimée à l'aide de méthodes robustes comme RANSAC (Random Sample Consensus) afin de traiter la présence de correspondances aberrantes. Les méthodes locales peuvent bien fonctionner sans information préalable sur les paramètres d'homographie. Cependant, dans certains cas, le calcul robuste peut être coûteux en ressources et ne pas fonctionner en temps réel. Un état des lieux sur les détecteurs et descripteurs de points clés peut être trouvé dans [8].

D'autre part, les méthodes globales utilisent toutes les informations de l'image et tentent de trouver la matrice d'homographie qui aligne le mieux l'image template à l'image test. Ce processus engendre cependant des problèmes de NLM, qui peuvent être résolus à l'aide d'algorithmes itératifs comme la descente de gradient ou la méthode *Levenberg-Marquardt*

[9]. Ainsi, une bonne initialisation est nécessaire pour garantir la convergence de ces algorithmes. Différentes fonctions de similarité existent pour mesurer le degré d'alignement des images, les plus utilisées étant le SSD (Sum of Squared Differences) et le coefficient de corrélation amélioré (ECC) [10]. Ces méthodes ont l'avantage de pouvoir fonctionner en temps réel et de donner de bons résultats si une estimation grossière des paramètres d'homographie est connue. Ainsi, les deux familles de méthodes sont complémentaires. La première est robuste sans nécessiter d'information a priori, mais coûteuse en ressources, tandis que la seconde est rapide et fonctionne bien si une information préalable est disponible.

4.2.5 Approche proposée

Dans nos travaux, deux approches sont utilisées pour estimer la pose 3D du quadricoptère par rapport à l'objet d'intérêt, comme montré dans la figure 4.3. La première approche est utilisée pour détecter l'objet d'intérêt. La seconde est utilisée dans le processus de suivi. L'approche est divisée en deux étapes : détection et suivi [11].

Dans l'étape de détection, la détection de template (template matching) sur une pyramide de l'image est utilisée pour rechercher l'objet désiré. Si le coefficient de corrélation normalisé est supérieur à un seuil prédéfini α , l'objet est déclaré détecté. Une fois la détection effectuée, une transformation d'homographie est calculée en utilisant la boîte englobante affinée de l'objet détecté pour déterminer la pose relative objet-caméra. Un ordre est ensuite envoyé au drone afin de le rapprocher de l'objet. Le matching de modèles est utilisé pour permettre la détection réussie de l'objet malgré sa grande distance par rapport à la caméra et sa petite taille, car le détecteur de points clés échoue à détecter et à mettre en correspondance des points clés si l'objet d'intérêt n'occupe pas un certain nombre de pixels de l'image. Cependant, une fois que la distance entre la caméra du drone et l'instrument est inférieure à un seuil λ , le descripteur SIFT (Scale Invariant Feature Transform) [12] est utilisé pour permettre plus de robustesse aux changements d'orientation.

L'objet est déclaré détecté si le nombre de points clés appariés est supérieur à une valeur prédéfinie N . Une fois l'objet détecté, la phase de suivi commence. Étant donné qu'une estimation grossière de la matrice d'homographie est disponible à partir de la phase de détection, elle est utilisée comme solution initiale pour la trame suivante, et l'algorithme ECC est appliqué pour estimer l'homographie dans cette trame. L'estimation de l'homographie est propagée de cette manière d'une trame à la suivante et utilisée comme un préalable pour l'algorithme ECC. Cependant, parfois, l'algorithme ECC peut échouer à converger pour plusieurs raisons. Par exemple, des problèmes de communication entre le quadricoptère et l'ordinateur peuvent rendre la dernière homographie estimée trop éloignée de la solution réelle de la trame actuelle, ce qui empêche la convergence de l'algorithme. De plus, la qualité de l'image peut être dégradée par un flou de mouvement ou des problèmes d'encodage/décodage vidéo H264. Une perte de suivi est déclarée si l'algorithme ECC est incapable de converger ou s'il converge vers une estimation irréaliste. À chaque trame, nous calculons la pose 3D du quadricoptère par rapport à l'objet plan. En surveillant la distance parcourue estimée entre deux trames consécutives et en la comparant à un seuil D , nous pouvons détecter une perte de suivi. Un autre seuil β est également imposé sur la différence de chaque angle d'orientation (lacet, roulis, tangage). Si le suivi échoue, nous revenons à la méthode locale (SIFT) si la distance quadricoptère-objet est relativement petite, ou à la méthode de matching de modèles dans l'autre cas, pour réinitialiser le tracker ECC, comme montré dans la figure 4.3. Cette estimation de pose est fusionnée avec des mesures inertielles envoyées par le drone dans le cadre d'un filtre de Kalman afin d'affiner cette estimation et de fournir de la robustesse lorsque le tracker visuel échoue. Le filtre de Kalman est également utilisé pour compenser les délais temporels, comme dans [3].

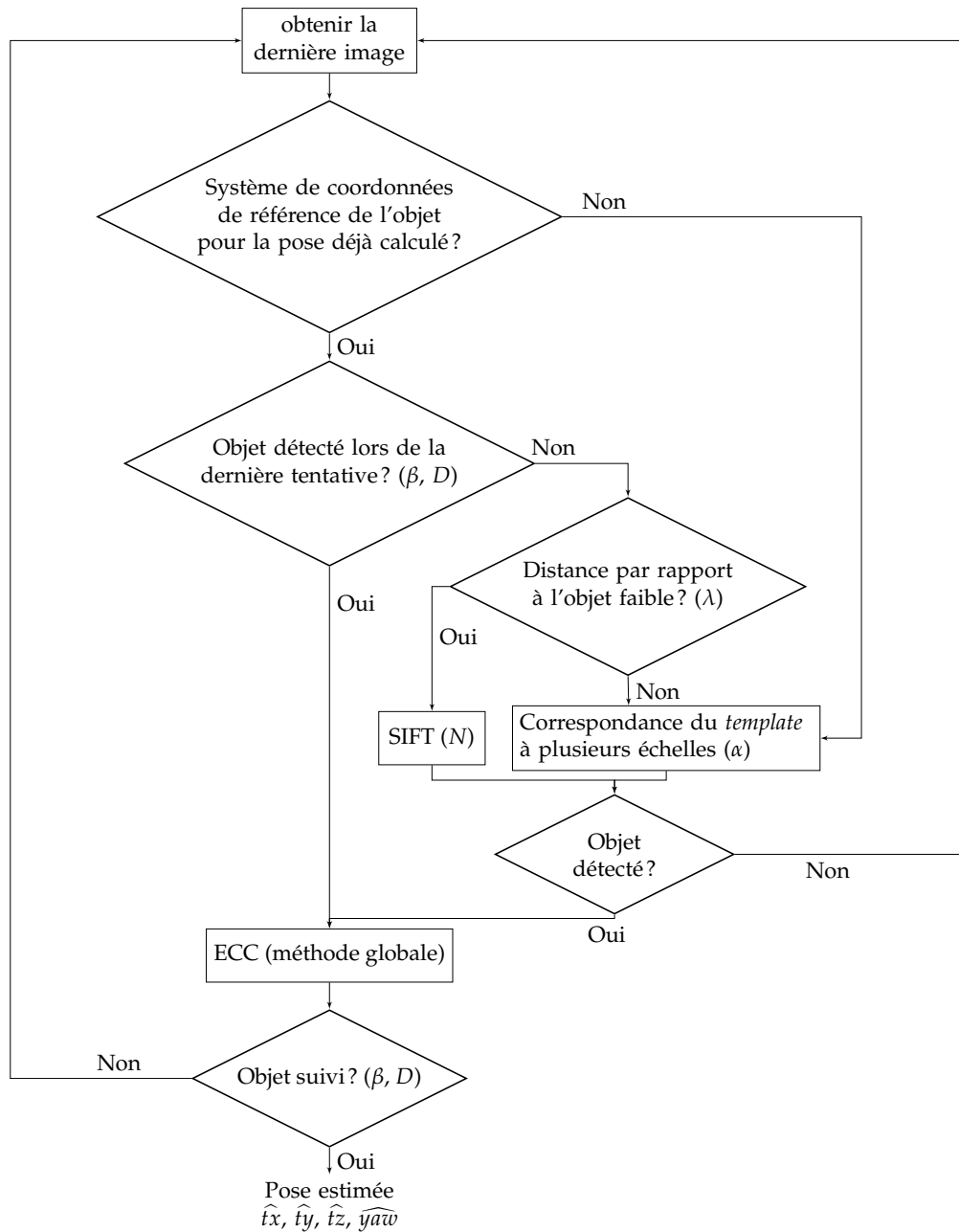


FIGURE 4.3 – Diagramme d'estimation de l'homographie.

4.2.6 Réglage des paramètres

L'approche proposée contient des paramètres qui doivent être choisis. Dans nos expériences, nous choisissons les valeurs présentées dans le tableau 4.1.

4.2.7 Estimation de la pose visage-caméra

Nous adoptons une approche 3D qui modélise le visage humain et utilise ensuite une projection perspective complète pour récupérer les paramètres de pose du visage en 3D. Grâce à cette modélisation et en l'associant à des données spécifiques à l'image relatives au visage, les 6 paramètres de pose sont inférés. La modélisation 3D est basée sur le modèle de visage déformable 3D Candide [13].

TABLE 4.1 – Réglages des paramètres utilisés pour l'estimation de l'homographie.

Algorithme	Paramètre	Valeur
ECC	α	0.8
SIFT	N	$10 < N < 30$
Tracking	β	15°
	D	30cm
Position	λ	$1\text{m} < \lambda < 3\text{m}$

Modèle 3D CANDIDE CANDIDE est un modèle de visage 3D (voir figure 4.4) paramétré spécifiquement développé pour le codage basé sur le modèle des visages humains. CANDIDE est contrôlé par 3 ensembles de paramètres : des paramètres globaux, des paramètres de forme et des paramètres d'animation. Les paramètres globaux correspondent à la pose du visage par rapport à la caméra. Il existe 6 paramètres globaux : 3 angles d'Euler pour la rotation et 3 pour la translation (t_x, t_y, t_z). Les paramètres de forme ajustent la position des caractéristiques faciales pour s'adapter à la morphologie de différents sujets (largeur des yeux, distance entre les yeux, hauteur du visage, etc.). Les paramètres d'animation ajustent la position des caractéristiques faciales pour afficher des expressions faciales et des animations dynamiques (sourire, abaissement des sourcils). Le modèle générique 3D est donné par les coordonnées 3D de ses sommets $P_i, i = 1, n$, où n est le nombre de sommets. De cette manière, la forme, jusqu'à une échelle globale, peut être entièrement décrite par un vecteur g de dimension $3n$, la concaténation des coordonnées 3D de tous les sommets :

$$g = G + S\tau_s + A\tau_a \quad (4.1)$$

G est la forme standard du modèle, les colonnes de S et A sont les unités de forme et d'animation, $\tau_s \in \mathbb{R}^m$ et $\tau_a \in \mathbb{R}^k$ sont les vecteurs de contrôle de forme et d'animation, respectivement.

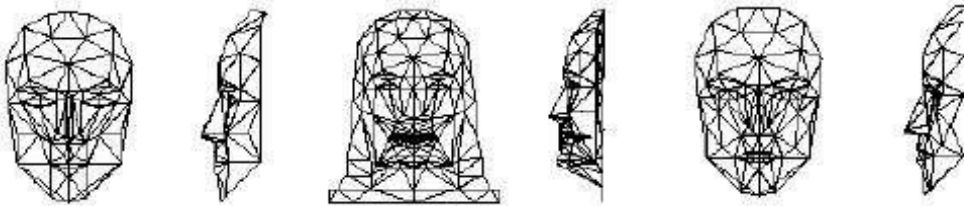


FIGURE 4.4 – Exemples de modèles de visage 3D CANDIDE.

Nous utilisons le détecteur de points faciaux dans [5], qui peut détecter 68 repères 2D sur un visage en une milliseconde grâce à un ERT (Ensemble d'Arbres de Régression) pré-entraîné, étant donné qu'un template d'image du visage est disponible. Cependant, puisque l'algorithme nécessite une région d'intérêt contenant un visage, le temps total pour son exécution, depuis la détection du visage jusqu'à la détection des repères, est supérieur à une milliseconde en raison de l'étape de détection de visage coûteuse en ressources. Une manière de réduire ce temps est d'effectuer une recherche du visage autour de la dernière boîte englobante détectée du visage, plutôt que de chercher le visage dans l'image entière. Nous utilisons seulement 46 points parmi les 68 points donnés par le détecteur de repères. Une fois les repères 2D détectés dans l'image, nous utilisons des algorithmes d'estimation de pose basés sur les correspondances de points 3D-2D pour récupérer la pose. Ce problème est connu

dans la littérature sous le nom de PnP (Perspective n Points). Nous utilisons la technique de Levenberg-Marquardt (LM) car elle donne de bons résultats et un temps d'exécution rapide. Si le suivi échoue, algorithme EPNP [14] (Efficient Perspective N Point) est utilisé. Le processus d'estimation de la pose face-caméra est montré dans la figure 4.5. La pose utilisée pour contrôler le drone est calculée en fusionnant la pose visuelle du modèle 3D avec des mesures inertielles et ultrasonores dans un filtre de Kalman comme décrit dans [3].

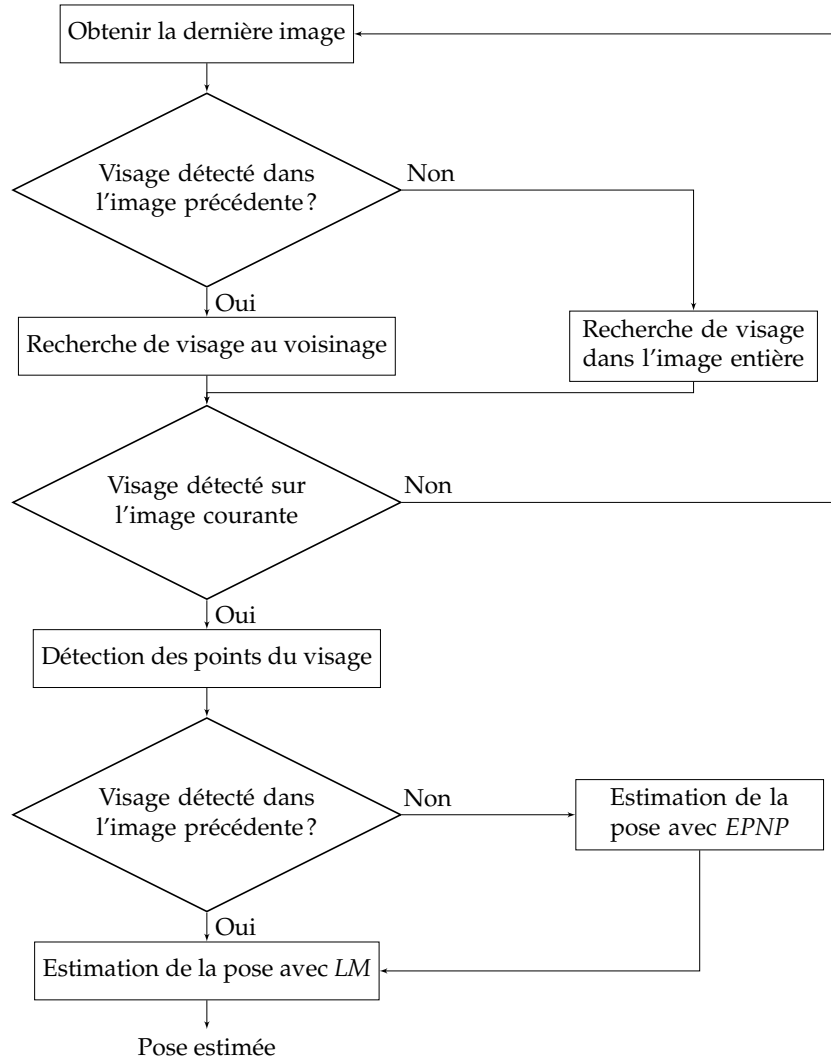


FIGURE 4.5 – Estimation de la pose face-caméra.

Evaluation de la performance de l'estimation de la pose visage-caméra. Nous comparons la précision de différentes techniques ainsi que leur temps d'exécution sur une base de données pour l'estimation de pose (base de données de pose de tête UPNA) [15]. La base de données UPNA contient 120 vidéos correspondant à 10 sujets différents, avec 12 vidéos chacun, dans lesquelles le sujet modifie la pose de sa tête en suivant des mouvements guidés et libres. La vérité terrain du mouvement 3D relatif du visage est connue pour toutes les images dans toutes les vidéos.

D'après nos tests, nous concluons que toutes les techniques convergent vers la même solution optimale, lorsqu'elles sont suivies par une NLM, à savoir l'optimisation de Levenberg-Marquardt. Comme indiqué dans le tableau 4.2, les deux premières méthodes donnent de mauvaises estimations pour les degrés de liberté *yaw* et *pitch*. Une erreur ou un bruit élevé dans ces paramètres entraînera une amplification du bruit dans les boucles de retour pour

le contrôle du drone.

TABLE 4.2 – Erreurs moyennes de pose et temps de calcul pour différentes méthodes d'estimation de pose de visage. t_x , t_y , t_z sont en millimètres, $roll$, yaw , $pitch$ en degrés, et le temps en millisecondes.

Method	t_x	t_y	t_z	roll	yaw	pitch	time
EPNP	11,84	7,11	12,67	0,55	3,74	2,39	0.117
Ransac P3P	12,50	7,79	18,34	1,56	6,52	6,11	0.898
EPNP + LM	11,51	7,23	13,38	0,56	2,28	1,45	0.363
Ransac P3P + LM	11,51	7,23	13,38	0,56	2,28	1,45	1.138
LM	11,51	7,23	13,38	0,56	2,28	1,45	0.234

Réponse du système face aux perturbations en utilisant l'objet comme point de localisation. Lors d'une série d'expériences, le drone est soumis à plusieurs impulsions sur chacun de ses degrés de liberté (DOF) séparément. Le système de localisation est celui basé sur la transformation homographique. La robustesse de la commande du drone soumis à ces perturbations a été validée. Un exemple de ce test est disponible en figure 4.6. Lors de ce test le quadricoptère a été poussé à gauche et à droite le long de son axe x . La figure 4.6 montre l'estimation de la pose du drone.

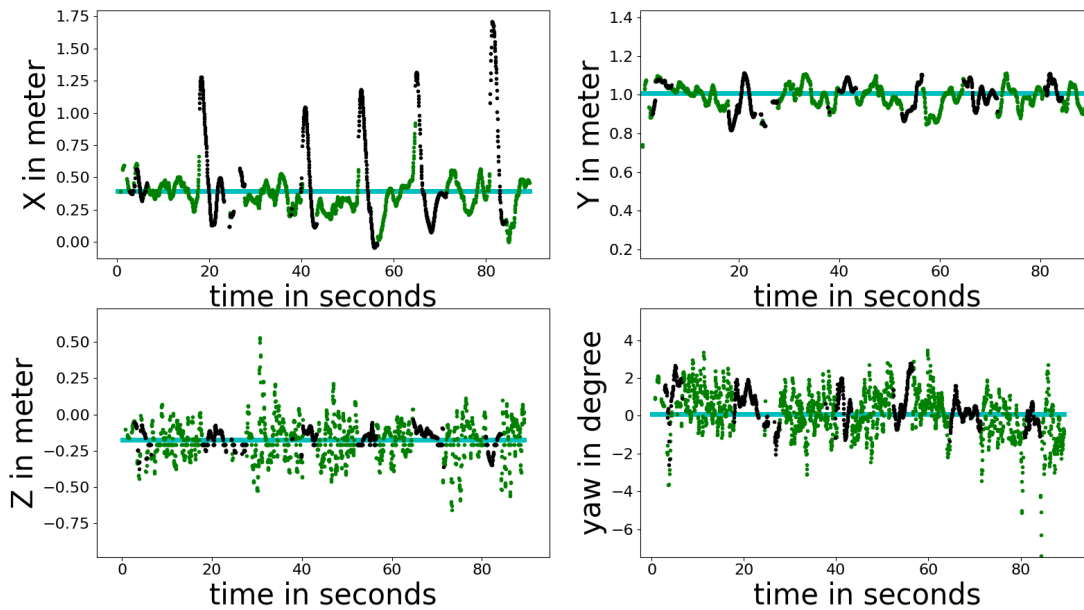


FIGURE 4.6 – Pose estimée du quadricoptère confronté à des perturbations le long de l'axe x . En vert : la pose estimée lorsque le suivi visuel de l'objet fonctionne ; en noir : l'estimation est basée uniquement sur les données de navigation et le modèle de prédiction du filtre de Kalman lorsque le suivi visuel échoue. Les lignes horizontales cyan indiquent la pose 3D désirée.

On peut voir comment l'impulsion donnée au drone peut provoquer un échec du suivi de l'objet (pose estimée tracée en noir) en raison de l'amplitude de l'impulsion et du fait que l'objet est hors du champ de vision du quadricoptère dans certains cas. Cependant, malgré

ce fait, et puisque l'estimation de la pose ne repose pas uniquement sur la modalité visuelle mais également sur la fusion des mesures de capteurs et d'un modèle de prédiction dans un cadre de filtrage de Kalman, l'estimation de la pose est suffisamment précise pour ramener le quadricoptère à une position où le suivi visuel pourra reprendre, et l'objet pourra être recentré dans l'image très rapidement (pose estimée tracée en vert dans la figure 4.6). Une vidéo de ces expériences de perturbation du drone est disponible¹.

4.2.8 Scénario type

Dans un contexte de laboratoire à distance, un scénario typique est le suivant : l'étudiant à distance envoie une commande au quadricoptère pour aller inspecter un instrument de mesure électronique. Après avoir reçu cette commande, le serveur indique au quadricoptère d'exécuter les différentes tâches pour accomplir la mission. Les différentes étapes sont illustrées à la figure 4.7. Une vidéo du déroulement d'un scénario type est disponible².

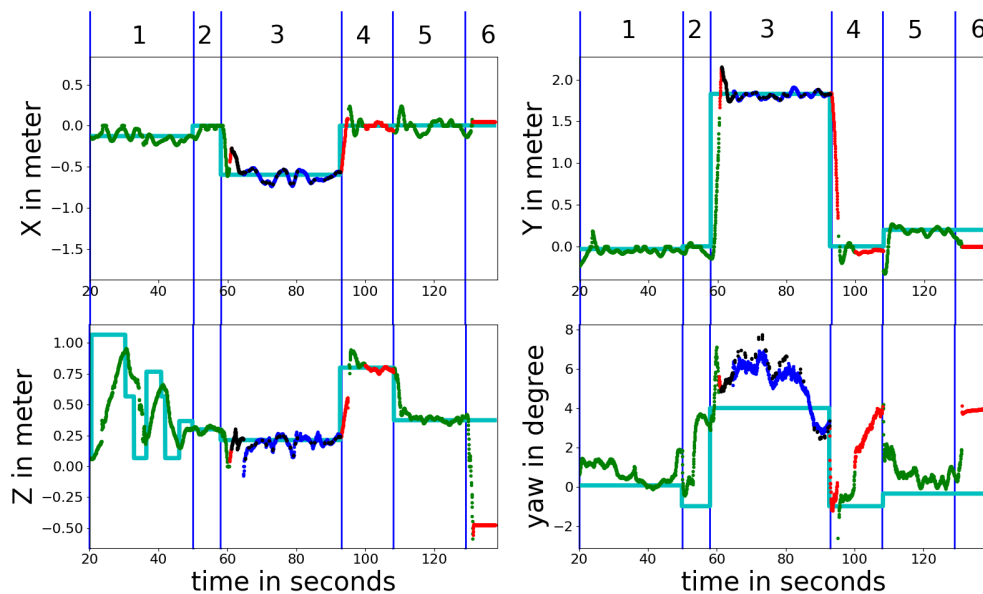


FIGURE 4.7 – Estimation de la pose dans le scénario d'inspection d'objet. Les chiffres 1 à 6 correspondent aux étapes du scénario. En vert : la pose estimée lorsque le suivi visuel **SLAM** fonctionne; en rouge : l'estimation est basée uniquement sur les données de navigation lorsque le **SLAM** perd le suivi; en bleu : la pose estimée à partir de la transformation homographique lors de l'inspection de l'objet; en noir : lorsque le suivi de l'objet échoue. Les courbes cyan indiquent la pose 3D désirée.

Étape 1 - Initialisation du système À cette étape, le drone décolle, initialise l'algorithme **SLAM** et estime l'échelle de la carte 3D. Comme illustré dans le graphique de la position z en fonction du temps dans la figure 4.7, le drone effectue un mouvement ascendant puis descendant après l'initialisation de **SLAM**. L'objectif est de modifier sa hauteur pour collecter des données nécessaires à l'estimation de l'échelle de la carte 3D (différence de déplacement vertical entre le capteur à ultrasons et l'algorithme **SLAM**). Pour ce faire, le drone exécute un mouvement lent et régulier de montée puis descente pendant quelques secondes.

1. Perturbations <https://youtu.be/Kr6TnjoByZ0>

2. Scénario type <https://youtu.be/PTMVeJizjF8>

Étape 2 - Détection et localisation de l'objet Après l'estimation de l'échelle, l'instrument de mesure électronique est recherché dans l'image à l'aide de la méthode décrite précédemment et sa position est estimée dans la carte 3D.

Une fois l'objet détecté dans l'image, l'homographie entre le plan 3D de l'objet et le plan image est estimée. Sur la base de cette homographie, la pose 3D de l'objet plan dans ce système peut être calculée en combinant plusieurs transformations entre les systèmes de coordonnées, comme illustré dans la figure 4.8.

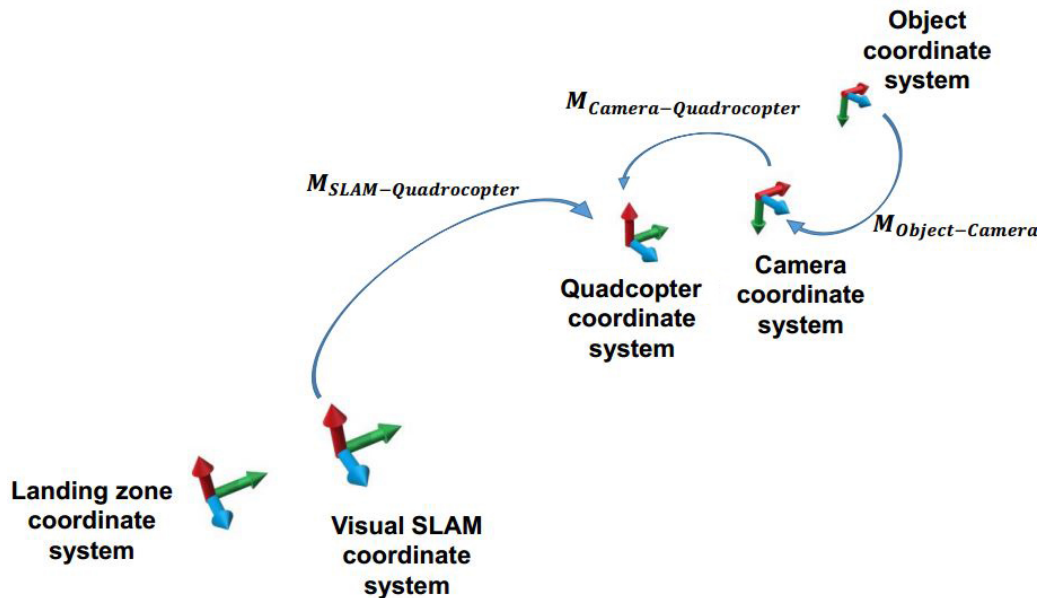


FIGURE 4.8 – Différents systèmes de coordonnées et transformations rigides utilisés dans l'application.

Ainsi, deux sources de localisation sont désormais disponibles pour le contrôle visuel en boucle fermée. La localisation permet de contrôler le quadricoptère par servo-contrôle visuel pour maintenir le lien entre le drone et l'appareil.

Le **SLAM** visuel fonctionne bien lorsqu'il y a suffisamment de points clés dans l'image pour les détecter et les faire correspondre aux points de la carte 3D. Cependant, à mesure que le quadricoptère se rapproche de l'appareil, la plupart des points clés disparaissent, et l'algorithme **SLAM** peut perdre le suivi. Dans ce cas, nous utilisons l'estimation de pose 3D fournie par l'algorithme homographique. Ainsi, le quadricoptère peut voler et inspecter la face-avant de l'équipement de laboratoire.

Étape 3 - Inspection de l'objet Lors de cette étape, le drone est dirigé vers l'objet pour le centrer dans l'image pendant une durée déterminée. La pose utilisée ici provient de la transformation homographique en utilisant l'objet d'intérêt comme repère.

Étape 4 - Retour à la base Après l'accomplissement de la mission, le drone retourne à sa position de départ. Il vole à une altitude élevée pour avoir une vue plus large du sol afin de localiser la plateforme d'atterrissage. L'estimation de pose utilisée à cette étape provient du système **SLAM**, car le drone s'éloigne de l'objet.

Étape 5 - Localisation de la plateforme d'atterrissage et préparation à l'atterrissage De manière similaire à la détection et à la localisation de l'objet, la plateforme d'atterrissage est détectée, et sa position est localisée dans la carte 3D. La caméra du drone orientée vers le

sol est alors utilisée. Le drone stationne au-dessus du centre de la plateforme à une certaine altitude, en préparation pour l'atterrissage.

Étape 6 - Atterrissage Une commande d'atterrissage est envoyée au drone. Ce dernier atterrit sur la plateforme et la mission est terminée.

4.2.9 Scénario de suivi de visage

Dans ce dernier scénario, nous testons les performances du système de servo-contrôle visuel pour le suivi de visage. Le drone doit voler, détecter un visage, aligner sa ligne de visée avec celle du visage et centrer ce dernier dans l'image tout en maintenant une distance fixe avec celui-ci.

Dans cette expérience, l'enseignant est en mouvement afin de perturber le système de contrôle. Le drone doit compenser les déplacements de l'enseignant ainsi que l'orientation hors-plan de son visage. La figure 4.9 illustre l'expérience vue depuis la caméra du drone et depuis une caméra externe. Une vidéo de l'expérience de suivi de visage est disponible³.

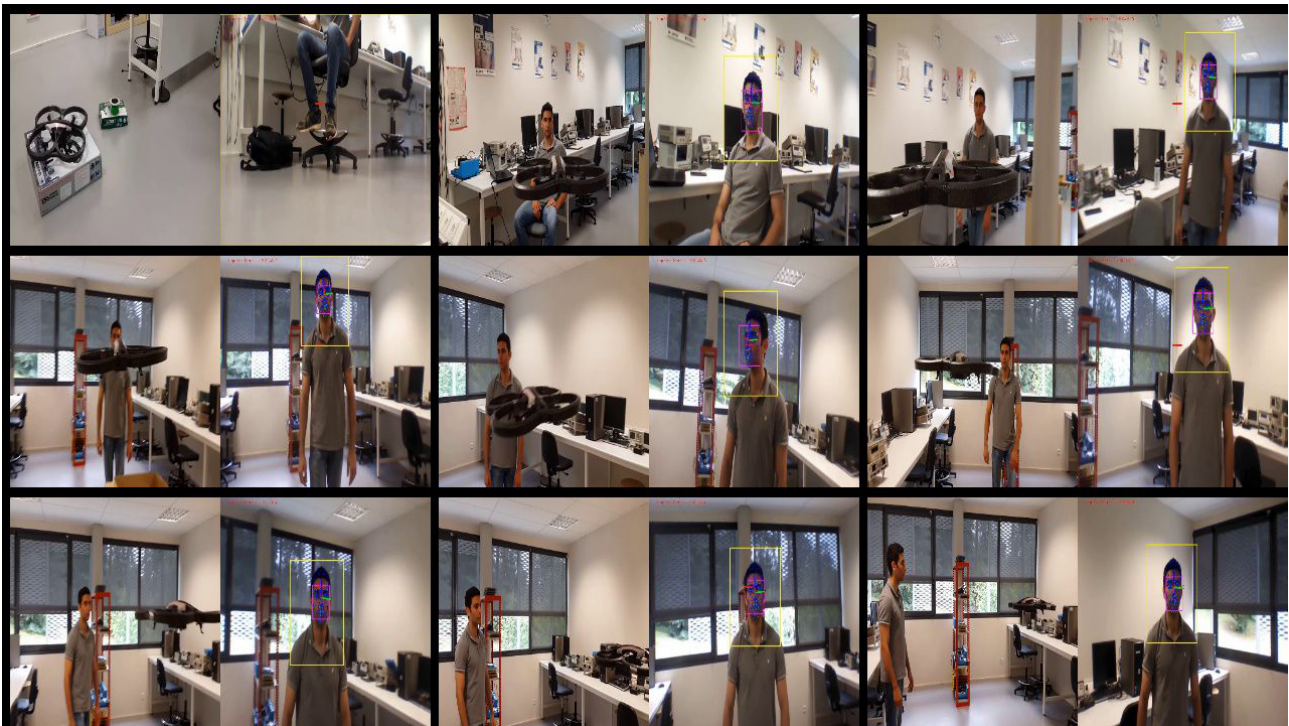


FIGURE 4.9 – Expérience du scénario de suivi de visage. 9 images correspondant à différents instants durant l'expérience. À droite, les images prises par la caméra embarquée du drone, à gauche, les images enregistrées simultanément par un téléphone portable.

4.2.10 Conclusion

Notre contribution réside dans un système de localisation capable de gérer toutes les situations rencontrées dans ce type de missions. Le système de localisation prend en charge les configurations intérieures lorsque le drone explore l'environnement 3D, examine un appareil ou retourne pour atterrir sur la plateforme de recharge automatique.

3. Suivi de visage : <https://youtu.be/Xytlz0UdaDk>

De plus, nous permettons au drone de rechercher un enseignant afin de faciliter la communication à distance entre étudiants et enseignant (dans le cas où un enseignant est présent dans le laboratoire). Ceci est réalisé grâce à une méthode d'estimation de la pose de la tête qui utilise une modélisation 3D du visage humain (modèle Candide) ainsi qu'une détection avancée des points caractéristiques du visage.

Des expériences approfondies ont été menées et démontrent la robustesse de l'approche ainsi que son efficacité malgré l'utilisation d'un drone à faible coût. La combinaison des deux systèmes de localisation (PTAM et transformation homographique) s'est avérée la plus adaptée à cette tâche en raison de sa simplicité et de ses performances.

Ces travaux ont fait l'objet de plusieurs communications dans un journal scientifique [16] et des conférences internationales [17, 18, 19, 11]

4.3 Suivi de civelles

4.3.1 Contexte

L'UMR Ecobiop effectue des recherches à la fois fondamentales et appliquées pour une gestion durable des populations naturelles de poissons diadromes. L'une de ses thématiques de recherche concerne l'étude du comportement migratoire des civelles (alevins d'anguille). L'hypothèse principale est que le comportement migratoire des civelles pourrait être lié à leurs réserves énergétiques car elles ne s'alimentent pas durant la période de leur migration estuarienne.

L'analyse de mouvement dans un environnement contrôlé peut servir pour détecter et suivre des civelles afin d'analyser leur comportement ou leur trajectoire. Des techniques mettant en œuvre du traitement d'images ainsi que de la vision par ordinateur permettent d'analyser et d'extraire des informations d'une séquence d'images afin de caractériser le comportement des poissons. Les premiers résultats obtenus par notre équipe en 2012 ont permis de valider la piste du suivi couleur multi-étiquette [20]. En 2014, un travail a été initié [21] avec l'objectif de développer un programme permettant aux biologistes de récupérer certaines informations en utilisant des techniques de traitement d'images.

Nous avons développé dans les travaux de thèse de Nawal Eldrogi [22] un système d'information complet répondant au besoin des chercheurs biologistes. L'objectif principal de cette thèse a été de construire un système automatique permettant aux biologistes de suivre, dans des séquences vidéos, des civelles marquées et filmées en bassin d'étude. Une étude approfondie de la littérature sur la détection et le suivi d'un animal aquatique nous a permis de définir une taxonomie des méthodes proposées et de remarquer que la plupart des algorithmes de suivi consistent à considérer les séquences vidéos comme des successions d'images et à les traiter image par image. A contrario, nous proposons de traiter la séquence vidéo en tant que telle, prenant en compte la dimension temporelle pour estimer le mouvement inter-images.

Le système d'information développé est basé sur un algorithme permettant :

- d'assurer le suivi automatique des civelles,
- de déterminer le sens de leur passage (avec ou contre le courant), de leur vitesse et de les compter,
- de réduire le temps de travail d'observation,
- de tenter de vérifier l'hypothèse selon laquelle le comportement migratoire des civelles est lié à leurs réserves énergétiques et à la vitesse à laquelle elles utilisent ces réserves.

Un second objectif est de montrer ce que peut apporter le traitement d'images pour inférer d'autres informations sur le comportement de l'animal.

4.3.2 Le dispositif expérimental

Le chronotron

Pour étudier le comportement migratoire de la civelle, un aquarium spécifique, appelé chronotron a été conçu par les biologistes (voir figure 4.10). Il est de forme ovale, de longueur 1.50 m et de largeur 0.50 m, et il est séparé en son centre par une paroi rigide.

Le système permet de choisir le sens du courant grâce à deux pompes, situées aux extrémités opposées de l'aquarium. Elles sont programmées pour fonctionner alternativement toutes les 6,2 heures afin de reproduire le rythme des marées. La température de l'eau est maintenue à $11 \pm 0.5^\circ\text{C}$ et une couche de gravier couvre le fond de l'aquarium. La vitesse du courant d'eau est mesurée avec un débitmètre. La taille moyenne d'une civelle est de 7cm,

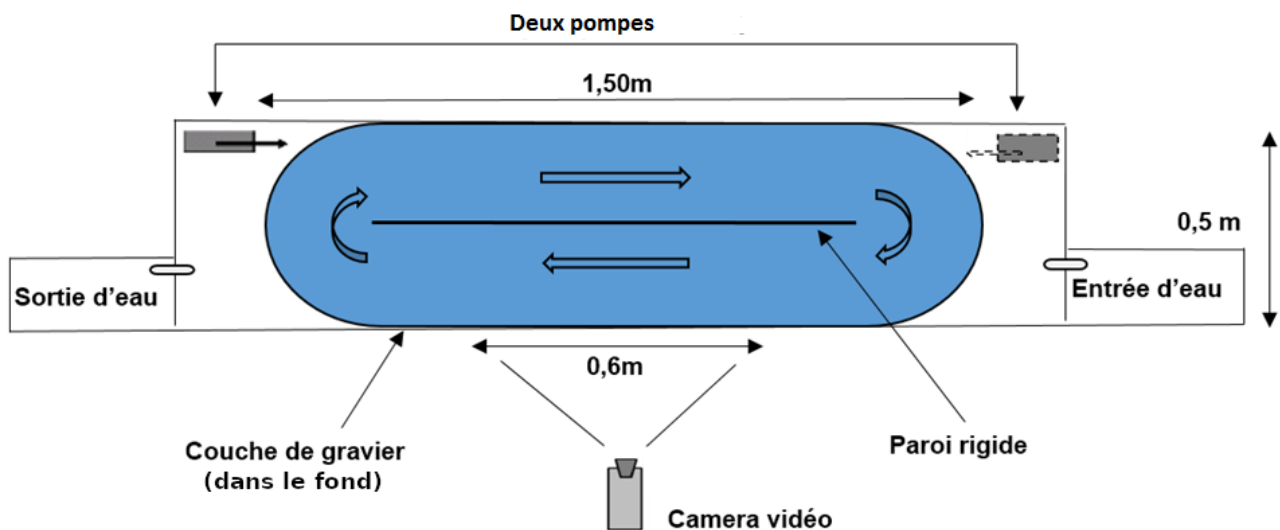


FIGURE 4.10 – Schéma du chronotron (vue de dessus).

certaines sont marquées avec des combinaisons de couleurs (système de marqueur avec implant élastomère visible VIE) pour pouvoir être identifiées. L'ensemble du chronotron est éclairé par une lumière faible durant la journée, et par une lumière ultraviolette 24h/24 afin de voir le marquage fluorescent des civelles même durant la nuit. La zone filmée concerne toute la colonne d'eau, sur une largeur de 60 cm.

Le système de codage VIE

Le système VIE (*Visible Implant Elastomer*) a été développé par les biologistes afin d'effectuer un marquage de poissons sans effets néfastes sur leur croissance, leur survie ou encore leur comportement [23].

Les biologistes ont adopté 36 marquages uniques décrits dans le tableau 4.3. Un exemple de civelles marquées est disponible sur la figure 4.11.

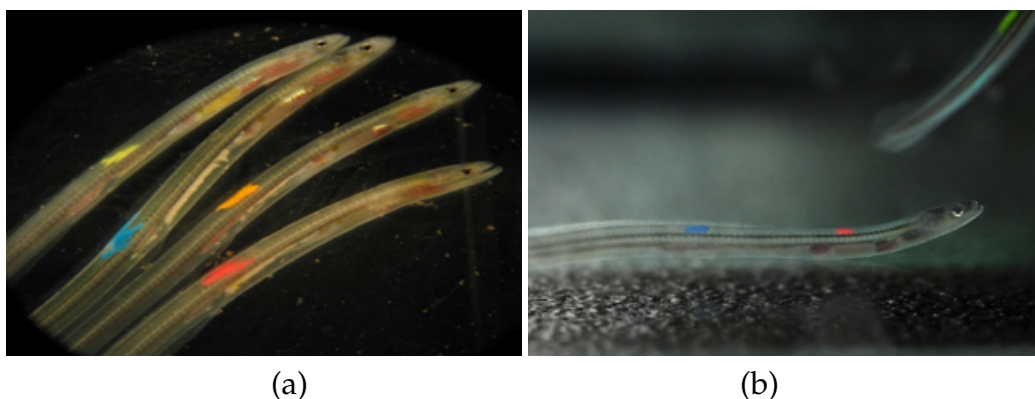


FIGURE 4.11 – Civelles marquées avec le système d'étiquettes couleurs.

Séquences vidéos

Les séquences vidéo sont enregistrées automatiquement par une caméra avec un niveau de sensibilité adapté aux conditions de luminosité. La résolution de la caméra est de 1280×960 pixels et la fréquence d'acquisition des images est de 15 images/seconde. Des enregistrements vidéo d'une durée de 15 secondes sont réalisés toutes les 40 minutes pendant

TABLE 4.3 – Tableau de marquage.

Code Couleur	Abréviation	Code Couleur	Abréviation
Bleu	B	Orange	O
Bleu Bleu Court	BBC	Orange Orange Court	OOC
Bleu Bleu Long	BBL	Orange Orange Long	OOL
Bleu Orange Court	BOC	Orange Bleu Court	OBBC
Bleu Orange Long	BOL	Orange Bleu Long	OBL
Bleu Vert Court	BVC	Orange Vert Court	OVC
Bleu Vert Long	BVL	Orange Vert Long	OVL
Bleu Rouge Court	BRC	Orange Rouge Court	ORC
Bleu Rouge Long	BRL	Orange Rouge Long	ORL
Vert	V	Rouge	R
Vert Vert Court	VVC	Rouge Rouge Court	RRC
Vert Vert Long	VVL	Rouge Rouge Long	RRL
Vert Bleu Court	VBC	Rouge Bleu Court	RBC
Vert Bleu Long	VBL	Rouge Bleu Long	RBL
Vert Orange Court	VOC	Rouge Vert Court	RVC
Vert Orange Long	VOL	Rouge Vert Long	RVL
Vert Rouge Court	VRC	Rouge Orange Court	ROC
Vert Rouge Long	VRL	Rouge Orange Long	ROL

une durée de 8 jours. La base de données comporte plusieurs centaines de séquences vidéo de civelles filmées en mouvement dans l'aquarium [24][25]. Une image type issue d'une des vidéos est disponible en figure 4.12.

4.3.3 Description de l'algorithme de traitement des vidéos

Les principales étapes de notre approche sont schématisées sur la figure (4.13) :

Pré-traitement Afin d'améliorer la qualité de l'image pour les étapes de détection et d'estimation, des techniques classiques de filtrage sont appliquées, notamment le filtre moyen-neur [26].

Détection de mouvement La soustraction de fond est utilisée pour détecter les marquages de civelles dans une vidéo. Cette méthode a fait ses preuves dans de nombreuses études [27]. L'image de référence contient les zones statiques et est obtenue par un calcul de la moyenne arithmétique des premières images de la séquence, puis elle est réactualisée au cours du temps afin qu'elle s'adapte aux évolutions éventuelles de la scène (changement de luminosité par exemple). La différence entre l'image courante et l'image de référence est effectuée pour obtenir le masque binaire du premier plan par un seuillage. L'opération est effectuée pour l'ensemble des 3 plans RVB. Ces images binaires sont ensuite combinées à l'aide d'un opérateur logique "OU". Afin de diminuer le nombre de fausses détections, une opération morphologique est nécessaire pour éliminer le bruit. Ici deux opérations morphologiques sont utilisées : la dilatation et l'érosion. Dans le but d'extraire toutes les informations géométriques, et dénombrer les marques de civelles afin de les identifier selon leur marquage (unique, double long, double court, voir tableau 4.3) et quantifier leurs passages dans la

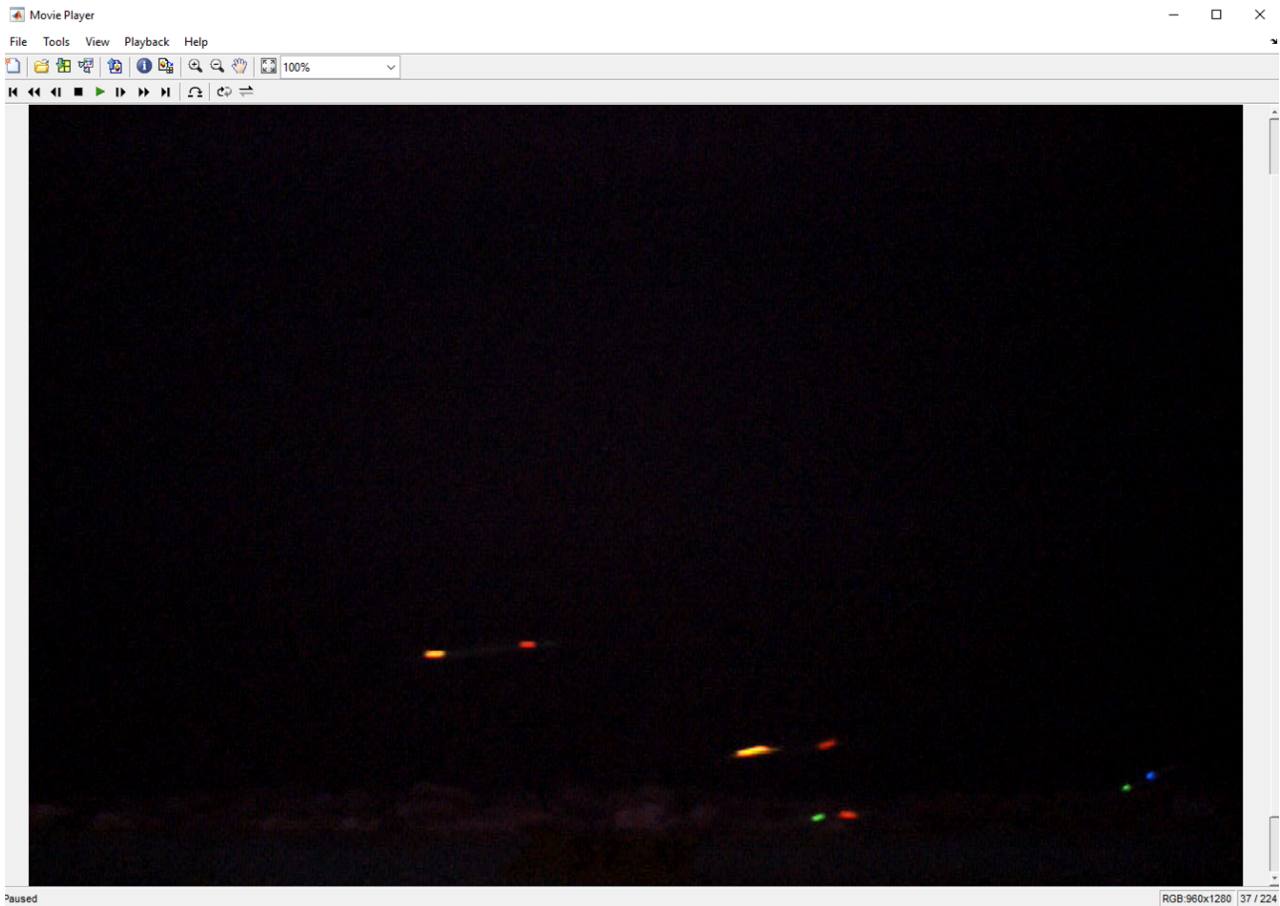


FIGURE 4.12 – Image typique des vidéos de civelles marquées. Ici passage de civelles à double marquage.

vidéo, une analyse des composantes connexes ou étiquetage des pixels est effectuée. Cette opération est appliquée sur l'image binaire de l'avant-plan par connexité-4 afin de détecter le plus petit objet significatif.

Classification Après avoir extrait les informations géométriques comme le centre de gravité, la longueur et la largeur de la boîte englobante de chaque marquage, il reste à déterminer leur couleur. Pour cela, nous transformons notre système de couleur RVB en système TSV (teinte, saturation, valeur) en raison de l'indépendance entre les composantes dans cet espace perceptif. Ensuite, une classification non-supervisée est appliquée sur la composante de teinte T en se basant sur la couleur du pixel du centre de gravité. Pour classer les détections, l'algorithme des *K-means* est appliqué, cinq groupes ($K = 5$) ont été considérés dont quatre correspondant aux couleurs de marquage (Bleu, Vert, Rouge, Orange) et le cinquième correspondant aux civelles non marquées.

Suivi Un suivi des civelles est assuré par l'utilisation du filtrage de Kalman. L'algorithme utilise deux étapes majeures, une étape de prédiction qui permet de prédire la position courante par la position estimée de l'instant précédent, et une étape de correction qui utilise la mesure observée de l'instant courant pour corriger l'état prédit dans le but d'obtenir une estimation plus précise.

Pour faciliter l'estimation par Kalman, les paramètres d'état à considérer pour chaque civelle sont les coordonnées du centre de gravité, la longueur et la largeur de la boîte englobante.

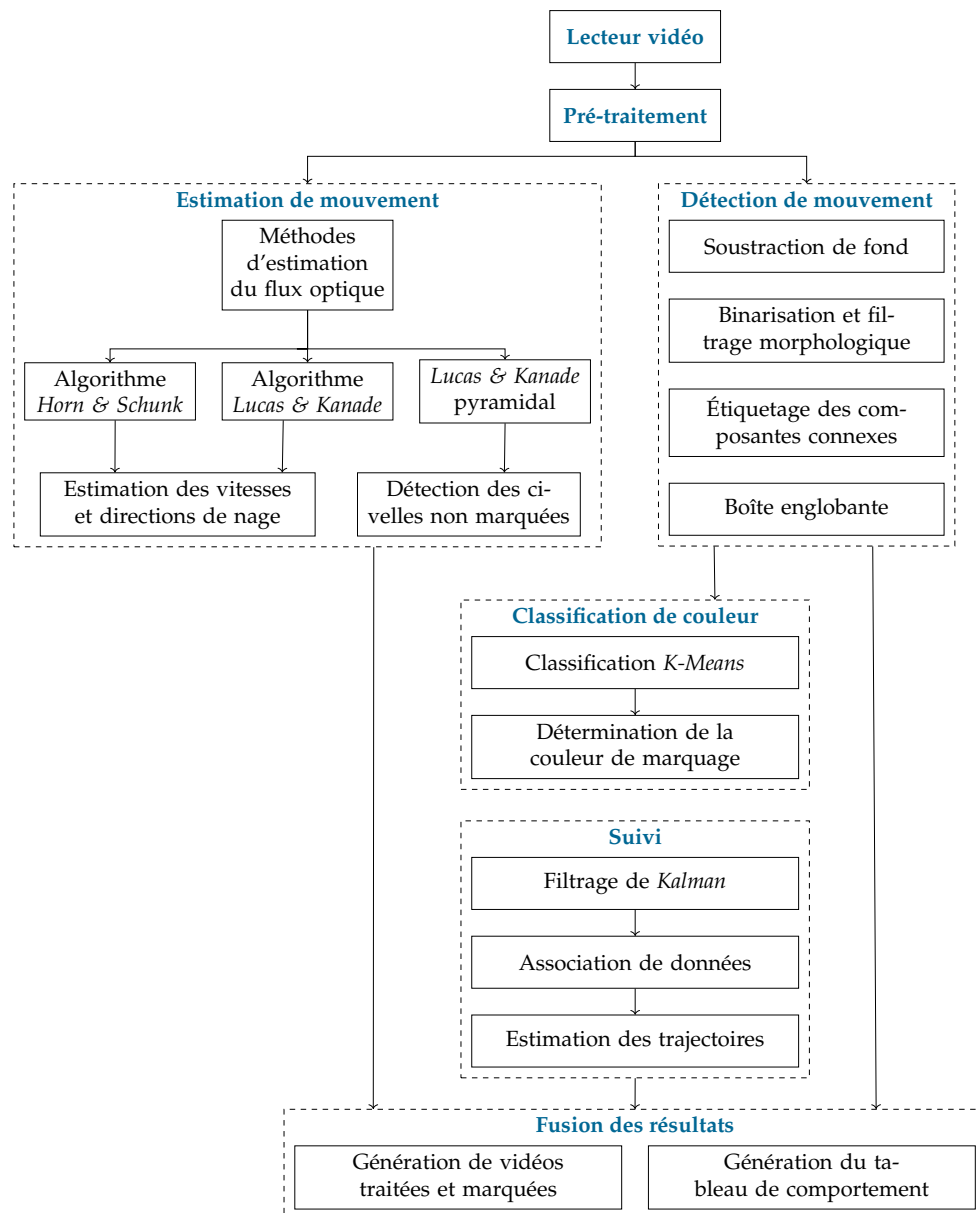


FIGURE 4.13 – Les principales étapes de l’approche de suivi de cibles.

L’estimation des caractéristiques dynamiques des objets est un problème classique dans les systèmes de suivi. Pour réaliser cette estimation, le rôle de l’étape d’association de données est de mettre en relation les informations (mesures) de l’instant courant avec celles des instants précédents, elle consiste à identifier les objets afin de construire une trajectoire complète. Dans notre approche, l’association des données repose sur l’utilisation d’un algorithme d’optimisation appelé l’algorithme hongrois.

Estimation de mouvement Dans le but d’obtenir et de visualiser des informations plus précises sur le déplacement des cibles, le mouvement des cibles est estimé par les méthodes différentielles de flux optique qui tentent de calculer le mouvement à chaque position de pixel entre deux trames d’image qui sont prises aux instants (t) et $(t + \Delta t)$.

Ces méthodes sont basées sur des approximations locales de la série Taylor du signal d’image; c’est-à-dire qu’elles utilisent des dérivées partielles par rapport aux coordonnées spatiales et temporelles.

Dans notre algorithme, la seule information alors disponible est l’intensité lumineuse

de chaque pixel et nous définissons le flux optique entre deux images successives de deux manières. D’une part via un calcul global (algorithme de Horn & Schunk) en optimisant une fonction basée sur les résidus de la contrainte de constance de la luminosité, et un terme de régularisation particulier exprimant le lissage attendu du champ de vecteurs. D’autre part un calcul local (algorithme de Lucas & Kanade) en supposant que le flux est essentiellement constant dans un voisinage local (Ω) du pixel considéré et en résolvant les équations de flux optique de base pour tous les pixels de ce voisinage, par le critère des moindres carrés.

Pour prendre en compte de grands déplacements, nous utilisons une version multi-échelle de cette méthode. On considère pour cela une pyramide d’images construite par filtrages gaussiens et sous-échantillonnages successifs de l’image originale. Les vecteurs de déplacements sont d’abord estimés avec une échelle grossière et servent ensuite d’initialisation aux échelles plus fines (en descendant la pyramide).

Fusion des résultats Enfin, grâce à la fusion des différentes étapes de notre approche, on peut construire une table de comportement qui contient tous les paramètres dynamiques des civelles comme la vitesse, le sens de nage et de leur ondulation. Ces paramètres pourront aider les biologistes à estimer la dépense énergétique de la civelle liée à sa migration.

4.3.4 Synthèse des résultats

Pour valider nos résultats, nous les comparons avec le système manuel utilisé par les biologistes. Cette comparaison est faite selon différents facteurs mentionnés ci-dessous.

Automatisation le système d’origine est un système manuel. Pour suivre les civelles dans les séquences vidéos, les biologistes observent ces séquences manuellement, ce qui prend plusieurs heures pour les analyser. Nous avons développé une interface graphique (voir figure 4.14) construite avec le logiciel Matlab2016, avec les fonctionnalités suivantes :

- analyser automatiquement une vidéo ou plusieurs vidéos,
- extraire automatiquement des paramètres comme le sens de nage de civelle par rapport au courant, l’angle d’orientation, le champ de vecteurs-vitesse,
- générer des tableaux de synthèse des résultats et des histogrammes pour rendre plus facile la compréhension de certains paramètres.

Temps d’analyse d’une vidéo Le bénéfice d’une automatisation permet d’obtenir plus d’informations mais aussi de réduire le temps de traitement manuel de 6 à 2 minutes.

Sens de passage des civelles La comparaison entre les tableaux obtenus automatiquement et les tableaux manuels de la vérité terrain montre une convergence des résultats. Cependant, nous avons remarqué quelques différences liées à des erreurs d’identification du type de code (confusion entre code court et code long ou vice-versa).

Trajectoire de civelle Le système d’origine ne donne pas d’information sur le déplacement ou sur l’allure de la trajectoire des civelles. Dans l’une des études [24], le logiciel EthoVision est utilisé. Celui-ci permet de suivre un certain nombre de civelles à marquage unique. Mais ce logiciel ne peut pas suivre les civelles à double marquage, ce qui rend difficile la détermination de leur trajectoire. Dans notre algorithme, nous avons extrait la trajectoire de chaque civelle après avoir résolu les problèmes d’intersection entre les couleurs de marquages, d’occlusion entre civelles et de disparation. Un couplage manuel est envisagé pour certaines



FIGURE 4.14 – Interface principale du programme de suivi.

trajectoires complexes. La figure 4.15 illustre le suivi d'une civelle à double marquage issu de notre logiciel.

4.3.5 Conclusion

Lors de ces travaux un nouvel algorithme pour la détection et le suivi de civelles marquées en aquarium a été développé. Cet algorithme repose sur plusieurs techniques couramment utilisées en vision par ordinateur. L'agencement de ces techniques et l'adaptation des différents paramètres des algorithmes ont pu être étudiés et mis en œuvre pour tendre vers une détection optimale. Bien que les résultats du suivi dans la plupart des séquences d'images testées soient satisfaisants, il y a plusieurs perspectives intéressantes pour améliorer notre algorithme de suivi. Certaines d'entre elles sont présentées dans la liste suivante :

- pour les biologistes, l'utilisation d'un code couleur à trois marques (au lieu de 2) augmente le nombre de civelles identifiables et permet de bien les distinguer dans les vidéos.
- il serait pertinent d'éviter autant que possible l'utilisation consécutive des couleurs Orange et Rouge qui posent un problème pour distinguer ces 2 couleurs de marquage (très proches dans l'espace colorimétrique).
- améliorer la phase de pré-traitement qui est une étape cruciale en traitement d'images afin d'éliminer le bruit d'acquisition et simplifier la tâche des traitements ultérieurs.
- dans la phase de détection, essayer d'autres méthodes pour construire l'image d'arrière-plan et déterminer un seuil de détection par des techniques automatiques (seuillage entropique par exemple [28]) permettant d'améliorer la détection de la partie dynamique de l'image (avant-plan); de plus, améliorer le filtre morphologique utilisé pour nettoyer l'image binarisée.

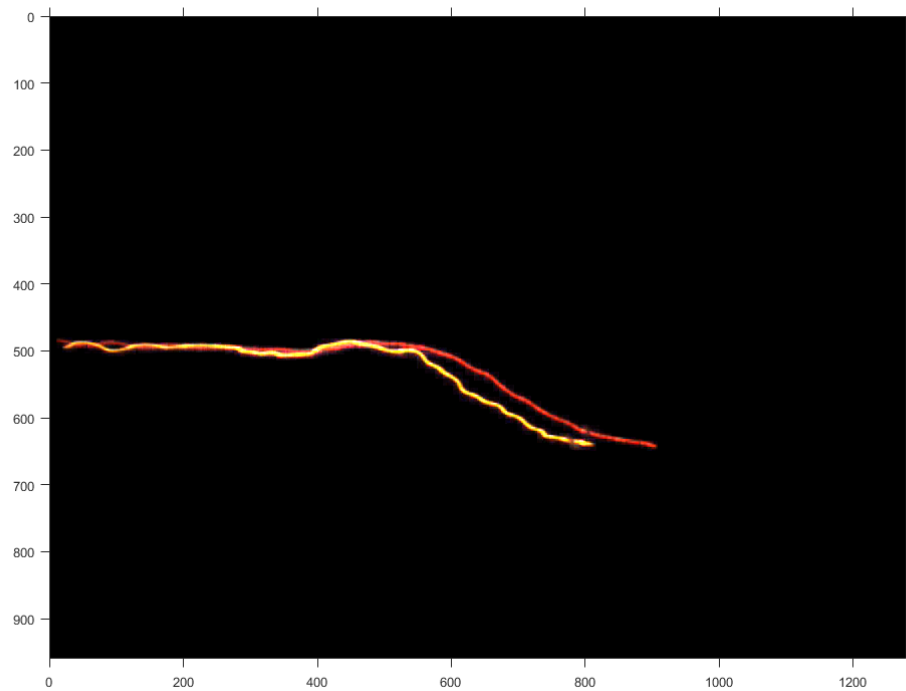


FIGURE 4.15 – Couplage entre les trajectoires du double marquage d’une civelle ORL.

- en ce qui concerne le suivi par le modèle dynamique de Kalman, les différences d’une vidéo à l’autre nous obligent parfois à modifier les paramètres de suivi afin de déterminer les valeurs les plus adaptées à cette vidéo (réglage ad hoc).
- l’association des marquages détectés se fait par l’algorithme d’optimisation hongrois et donne des résultats assez satisfaisants. L’utilisation d’une autre méthode d’optimisation peut nous aider à améliorer encore la mise en correspondance des trajectoires ainsi que le temps de calcul de notre système.
- nous avons pu identifier les civelles grâce à une méthode de régression polynomiale afin de coupler les trajectoires des poissons ayant un double marquage. Cette étape a besoin de modification pour qu’elle puisse s’adapter au code à trois marquages envisagé par les biologistes.

Les travaux réalisés pendant la thèse de N. Eldrogi ont donné lieu aux communications suivantes : 1 journal scientifique [29], une conférence internationale [30] et 2 conférences nationales [31, 32].

Références personnelles

- [11] F. KHATTAR, F. DORNAIKA, B. LARROQUE et F. LUTHON. « 3D Object-Camera and 3D Face-Camera Pose Estimation for Quadcopter Control : Application to Remote Labs ». In : *International Conference on Advanced Concepts for Intelligent Vision Systems*. Springer. Poitiers, France, 2018, p. 99-111.
- [16] F. KHATTAR, F. LUTHON, B. LARROQUE et F. DORNAIKA. « Visual Localization and Servoing for Drone Use in Indoor Remote Laboratory Environment ». In : *Machine Vision and Applications* 32 (2021). DOI : [DOI:10.1007/s00138-020-01161-7](https://doi.org/10.1007/s00138-020-01161-7).
- [17] F. KHATTAR, F. LUTHON, B. LARROQUE et F. DORNAIKA. « Using computer vision for student-centred remote lab in electronics ». In : *8th Int. Conf. on Education and New Learning Technologies (EDULEARN16)*. Barcelone, Spain, juill. 2016, p. 614-623.
- [18] F. LUTHON, B. LARROQUE, F. KHATTAR et F. DORNAIKA. « Use of gaming and computer vision to drive student motivation in remote learning lab activities ». In : *10th Int. Conf. of Education, Research and Innovation (ICERI 2017)*. Seville, Spain, nov. 2017, p. 2320-2329.
- [19] F. KHATTAR, F. DORNAIKA, F. LUTHON et B. LARROQUE. « Quadcopter Control Using Onboard Monocular Camera for Enriching Remote Laboratory Facilities ». In : *21th IEEE Int. Conf. on Automation, Quality and Testing, Robotics (AQTR 2018)*. Springer. Cluj-Napoca, Romania, 2018, p. 1-6.
- [29] N. ELDRUGI, F. LUTHON, B. LARROQUE, S. ALQADDAFI et V. BOLLIET. « Motion Estimation of Glass Eels by Differential Methods ». In : *International Science and Technology Journal (ISTJ)* (juill. 2018), p. 299-315. ISSN : 2519-9838.
- [30] N. ELDRUGI, F. LUTHON, B. LARROQUE, S. ALQADDAFI et V. BOLLIET. « Motion Estimation of Elver by Lucas and Kanade Optical Flow ». In : *2nd Annual Conference on Theories and Applications of Basic and Bio-Sciences*. 1st September 2018. Misurata University. Misurata, Libya, sept. 2018.
- [31] F. LUTHON, N. ELDRUGI et B. LARROQUE. « Estimation de mouvement de civelles par méthodes différentielles ». In : *Congrès National de la Recherche des IUT (CNRIUT'2023)*. 7-9 juin 2023. Saint-Pierre de la Réunion, France, juin 2023.
- [32] N. ELDRUGI, B. LARROQUE, V. BOLLIET et F. LUTHON. « Vision par Ordinateur pour Suivi de Civelles en Bassin ». In : *17è Journées ORASIS*. 27-31 mai 2019. Saint-Dié-des-Vosges, France, mai 2019.

Références

- [1] F. KHATTAR. « Enriching Remote Labs with Computer Vision and Drones ». Thèse de doct. Anglet, France : University of Pau & Pays Adour, 2018.
- [2] R. MUNGUIA, S. URZUA, Y. BOLEA et A. GRAU. « Vision-based SLAM system for unmanned aerial vehicles ». In : *Sensors* 16.3 (2016), p. 372.
- [3] J. ENGEL, J. STURM et D. CREMERS. « Scale-aware navigation of a low-cost quadcopter with a monocular camera ». In : *Robotics and Autonomous Systems* 62.11 (2014). Special Issue on Visual Control of Mobile Robots, p. 1646-1656. ISSN : 0921-8890. DOI : <http://doi.org/10.1016/j.robot.2014.03.012>.

- [4] G. KLEIN et D. MURRAY. « Parallel tracking and mapping for small AR workspaces ». In : *6th IEEE and ACM International Symposium on Mixed and Augmented Reality, ISMAR*. 2007, p. 225-234.
- [5] V. KAZEMI et J. SULLIVAN. « One millisecond face alignment with an ensemble of regression trees ». In : *Proceedings of the IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition*. 2014, p. 1867-1874.
- [6] J. P. HANSEN, A. ALAPETITE, I. S. MACKENZIE et E. MØLLENBACH. « The use of gaze to control drones ». In : *Proceedings of the Symposium on Eye Tracking Research and Applications*. ACM. 2014, p. 27-34.
- [7] G. MEDIONI et S. B. KANG. *Emerging topics in computer vision*. Prentice Hall PTR, 2004.
- [8] S. KRIG. *Interest point detector and feature descriptor survey*. Springer, 2014, p. 217-282.
- [9] S. ROWEIS. « Levenberg-Marquardt optimization ». In : *Notes, University of Toronto* (1996).
- [10] G. D. EVANGELIDIS et E. Z. PSARAKIS. « Parametric image alignment using enhanced correlation coefficient maximization ». In : *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence* 30.10 (2008), p. 1858-1865.
- [12] D. G. LOWE. « Object recognition from local scale-invariant features ». In : *Proceedings of the seventh IEEE International Conference on Computer Vision*. T. 2. 1999, p. 1150-1157.
- [13] M. RYDFALK. « CANDIDE, a parameterized face ». In : *Dept. of Electrical Engineering Tech. Rep. LiTH-ISY-I866* (1987).
- [14] V. LEPETIT, F. MORENO-NOGUER et P. FUA. « EPNP : An accurate $O(n)$ solution to the PNP problem ». In : *International Journal of Computer Vision* 81.2 (2009), p. 155.
- [15] M. ARIZ, J. J. BENGOCHEA, A. VILLANUEVA et R. CABEZA. « A novel 2D/3D database with automatic face annotation for head tracking and pose estimation ». In : *Computer Vision and Image Understanding* 148 (2016), p. 201-210.
- [20] J. MONTEJO. *Système d'information pour le dénombrement des civelles*. Master M1 Informatique. Université de Pau & des Pays de l'Adour (UPPA), 2012.
- [21] X. HEGUY et R. TALBI. *Projet Pibales*. Master M2 Informatique-Siglis. Université de Pau & des Pays de l'Adour (UPPA), 2014.
- [22] N. ELDRUGI. « Vision par ordinateur poursuivi automatique et caractérisation comportement de civelles ». 2021PAUU3063. Thèse de doct. Anglet, France : Université de Pau & des Pays de l'Adour (UPPA), 2021.
- [23] NORTHWEST MARINE TECHNOLOGY. *Visible Implant Elastomer Tag Project Manual*. 2009.
- [24] J. DELCOURT, M. YLIEFF, V. BOLLIET, P. PONCIN et A. BARDONNET. « Video tracking in the extreme : A new possibility for tracking nocturnal underwater transparent animals with fluorescent elastomer tags ». In : *Behavior research methods* 43.2 (2011), p. 590-600.
- [25] V. BOLLIET, P. LAMBERT, J. RIVES et A. BARDONNET. « Rhythmic swimming activity in *Anguilla anguilla* glass eels : Synchronisation to water current reversal under laboratory conditions ». In : *Journal of Experimental Marine Biology and Ecology* 344.1 (2007), p. 54-66.
- [26] P. BOLON et al. *Analyse d'images : Filtrage et segmentation*. Sous la dir. de J.-P. COCQUEREZ et S. PHILIPP. Enseignement de la physique. MASSON, oct. 1995.

- [27] A. SOBRAL et A. VACAVANT. « A comprehensive review of background subtraction algorithms evaluated with synthetic and real videos ». In : *Computer Vision and Image Understanding* 122 (2014), p. 4-21.
- [28] F. LUTHON, M. LIÉVIN et F. FAUX. « On the Use of Entropy Power for Threshold Selection ». In : *Signal Processing* 84.10 (oct. 2004). DOI : 10.1016/j.sigpro.2004.06.008.

Observation et traitement de signal

Sommaire

5.1	Système temps réel de mesures de pression d'impact de vagues	71
5.1.1	Contexte	71
5.1.2	Site expérimental	72
5.1.3	Prétraitement des signaux	77
5.1.4	Détection automatique des impacts	78
5.2	Caractérisation des signaux d'impact de vagues	78
5.2.1	Critères temporels	78
5.2.2	Critères de pression	79
5.2.3	Bases de données	80
5.3	Caractérisation et classification des signaux	81
5.3.1	Prévision de la pression d'impact des vagues	83
5.3.2	Clustering des types d'impacts des vagues	84
5.3.3	Travaux connexes	90
5.4	Traitement de signaux d'accélérométrie pour l'étude comportementale de poissons	92
5.4.1	Objectif	92
5.4.2	Les biologgers	92
5.4.3	Les huit étapes de traitement de l'application	93
5.4.4	Résultats	95
5.5	Perspectives	95
	Références personnelles	97
	Références	97

5.1 Système temps réel de mesures de pression d'impact de vagues

5.1.1 Contexte

En 2014, Stéphane Abadie professeur responsable de l'équipe **IVS** de mon laboratoire **SIAME** m'a sollicité afin de contribuer à l'étude de l'impact des vagues sur des structures côtières. L'équipe **IVS** étudie ce phénomène complexe. L'environnement hostile de l'océan

rend difficile l'acquisition de mesures de terrain sur de longues périodes et notamment lors de tempêtes. Nombre d'études ont été réalisées en laboratoire, permettant la compréhension de beaucoup de mécanismes. Toutefois, ces études en laboratoire ne représentent pas complètement la réalité. En effet, en laboratoire l'échelle est différente, les fluides utilisés sont différents, il n'y a pas de perturbations liées aux paramètres environnementaux (vent, courant, etc.) et le phénomène est en 2D alors qu'en cas réel il est en 3D. Il est donc nécessaire, afin d'avoir une meilleure compréhension des impacts de vagues sur les structures côtières, d'étudier ce phénomène sur le terrain à échelle réelle, là où les conditions ne sont pas configurables mais bien dépendantes de l'environnement. C'est dans ce cadre que nous avons mis en place une station de mesure *in-situ*, sur la digue de l'Artha à Saint-Jean-de-Luz, en France. Une vue satellite identifiant l'emplacement de nos capteurs ainsi que d'autres stations de mesures utiles à notre étude est présentée à la figure 5.1.

5.1.2 Site expérimental

La station expérimentale a été installée sur la digue de l'Artha. L'objectif est de mesurer les pressions d'impact des vagues sur cet ouvrage côtier. Ces mesures permettent de récolter, traiter et analyser un grand nombre de données de pressions d'impact de vague sur la digue. La première version de la station est présentée dans [1], [2] et [3]. Cette première version était équipée de seulement deux capteurs de pression, alignés sur l'axe vertical permettant d'enregistrer les pressions d'impact de vagues en 1D. Dans la suite de cette section nous allons présenter la nouvelle station que nous avons mise en place, composée de 16 capteurs de pression disposés sur l'axe vertical et sur l'axe horizontal, permettant d'enregistrer les pressions d'impact en 2D.

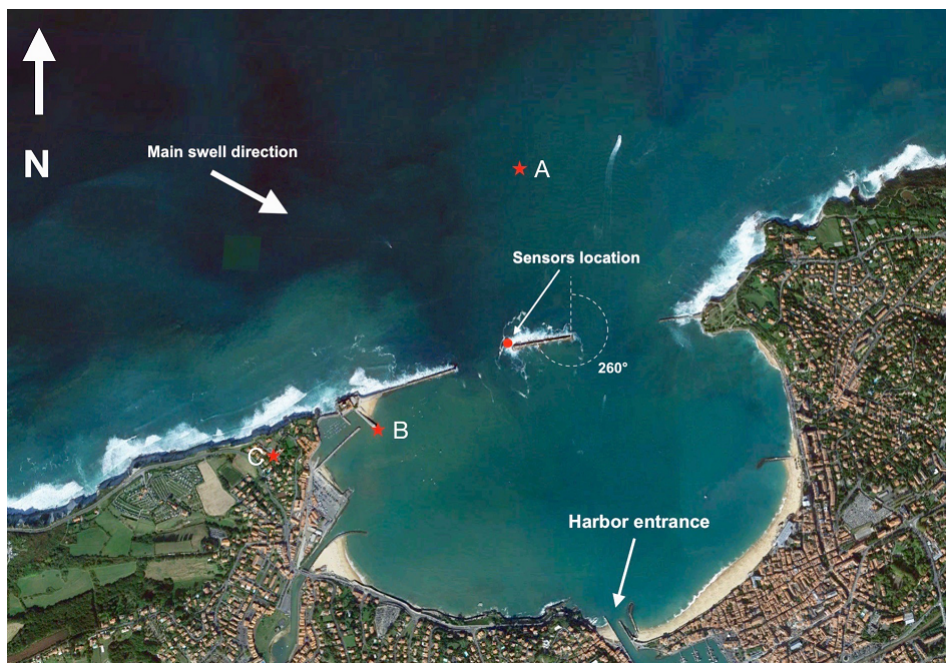


FIGURE 5.1 – Digue de l'Artha avec l'emplacement des capteurs indiqué par un point rouge. Les étoiles rouges correspondent à (A) Houlographe 06403 ; (B) Marégraphe de Socoa ; (C) Station météo de Socoa.

2. d'automatiser l'acquisition,
3. de stocker localement les données acquises localement,
4. d'être autonome électriquement,
5. de transmettre les données acquises sans réseau filaire,
6. d'être adapté à des conditions environnementales extrêmes.



FIGURE 5.3 – Photo du mur avec les capteurs. Le capteur 0 est entouré en rouge.

Station d'acquisition

La figure 5.4 schématise la station dans son ensemble. Sur cette figure nous pouvons voir les trois parties principales, qui sont l'alimentation électrique, l'acquisition des données des capteurs de pression et le système de transmission. La photo de la figure 5.5 montre l'installation électrique.

Nous utilisons un CompactRIO (ou [CRIO](#)) de National Instruments© [4] comprenant un microprocesseur pour la mise en œuvre d'algorithmes de contrôle. Le module FPGA du [CRIO](#) peut être utilisé pour implémenter une acquisition de données à haute fréquence. Le [CRIO](#) peut être programmé à distance. Le packaging du [CRIO](#) a pour avantage d'être robuste. Les modules d'acquisition conditionnant les signaux issus de nos capteurs sont les modules NI-9203, ayant une gamme d'entrée de ± 20 mA, 8 voies et une très bonne résolution (16 bits).

Système de transmission

La station est équipée d'un routeur 4G connecté au [CRIO](#) par Ethernet. Un réseau privé virtuel (VPN) est configuré pour assurer un canal de communication fiable et sécurisé avec le système d'acquisition de données.

Le système de transmission est le support de l'accès à distance permettant de :

- vérifier le bon fonctionnement de la station,

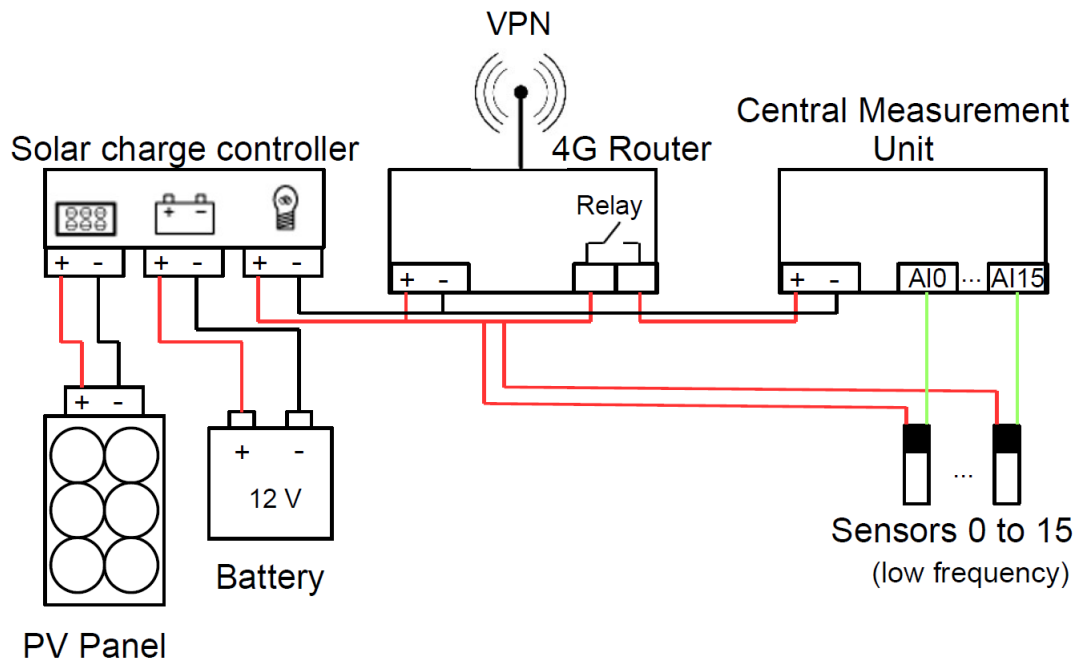


FIGURE 5.4 – Schéma de la configuration de l'instrumentation pour l'acquisition et la transmission de données autonomes

- modifier à distance le paramétrage de la station,
- changer le programme embarqué,
- consulter le nombre d'enregistrements actuellement stockés sur la station,
- rapatrier les enregistrements.

Stockage

Les données sont stockées sur des serveurs de l'université. Le réseau 4G peut être perturbé lors d'intempéries, ce qui entraîne une perte de l'accès à la station à distance pendant ces périodes. Il est alors nécessaire d'assurer le tampon entre le moment où les données sont enregistrées et le moment où elles seront rapatriées sur nos serveurs. Une clé USB de 128 Go est directement connectée au [CRIO](#) afin d'augmenter sa capacité de stockage et assurer cette fonctionnalité de sauvegarde locale.

Alimentation

La digue de l'Artha est un site isolé sur lequel aucune arrivée électrique filaire n'est disponible. Par conséquent, il est nécessaire de concevoir une installation autonome en énergie électrique. Pour cela, un système photovoltaïque est installé sur la digue, à l'abri des vagues.

Sur la figure 5.6 nous pouvons voir dans le cercle rouge la plaque qui protège l'armoire électrique de la station ainsi que le panneau photovoltaïque.

Algorithme d'acquisition

L'algorithme permet de lancer des acquisitions de mesures de pression sur la digue de l'Artha, d'enregistrer les données dans un fichier et d'envoyer ce fichier sur le serveur de l'université.



FIGURE 5.5 – Photo du panneau solaire et de l’installation électrique intégrée dans la digue.



FIGURE 5.6 – Photo de la digue de l’Artha où se situe la station et le panneau photovoltaïque. *N.B.* : Les capteurs sont sur l’autre pan de mur du musoir peint en blanc.

Logiciel de supervision

Le logiciel [PyScada](#) est utilisé afin d’interagir à distance avec les programmes et données manipulés par le système d’acquisition au travers de plusieurs fonctionnalités. Ce logiciel fournit une interface web permettant d’assurer la surveillance des différentes fonctionnalités implémentées dans la station. Ce logiciel a été installé sur un Raspberry Pi 4. La figure [5.7](#) schématise ce système. Sur cette figure le [CMU](#) intègre le Raspberry pi et le [CRIO](#).

Stratégie d’acquisition

Par défaut, la station fonctionne en mode *burst*, c’est-à-dire qu’elle enregistre les données de pressions à intervalles réguliers pendant une durée T_{acq} paramétrable. En effet, la station n’enregistre pas en permanence, mais par défaut pendant $T_{acq} = 10$ minutes à chaque début d’heure, 24h/24 et 7j/7. Cela permet de limiter le nombre de données tout en ayant des données de manière régulière et constante. Grâce à cela on constitue un échantillon de données suffisamment large pour avoir des pressions d’impact dans toutes les configurations météorologiques possibles. La station enregistre avec une fréquence d’échantillonnage $f_s = 10\text{kHz}$.

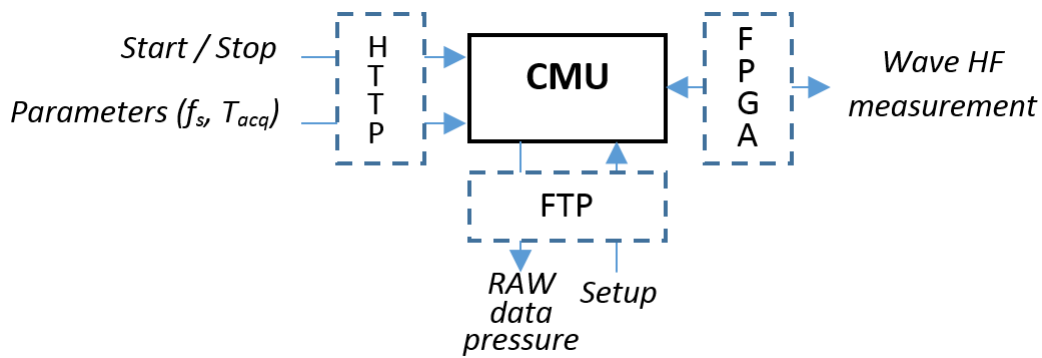


FIGURE 5.7 – Schéma synthétisant le logiciel embarqué permettant de communiquer à distance avec la station. **CMU** ; f_s : fréquence d'échantillonnage ; T_{acq} : durée d'une acquisition.

Malgré l'environnement hostile, la station fonctionne en permanence et est en général mise à l'arrêt seulement en été afin d'en faire la maintenance.

Données de pression de la station de l'Artha

La station enregistre donc les données provenant de ces 16 capteurs ($C = 16$), à une fréquence d'échantillonnage $f_s = 10\text{kHz}$ (ou 10.24kHz en fonction du paramétrage). Une acquisition de données de durée $T_{acq} = 10$ minutes est réalisée à chaque début d'heure. Un fichier d'acquisition de données représente donc 96 000 000 de valeurs de pression ($C \times f_s \times T_{acq} \times 60$). Chaque fichier d'acquisition, compressé *in-situ* au format ZIP, a une taille de 121 Mo. Afin d'optimiser l'espace et les performances, les données de la station ne sont enregistrées que si les valeurs de pression sur la capteur le plus bas dépassent un certain seuil. Typiquement ce seuil est choisi à une valeur un peu supérieure à la pression atmosphérique.

Données provenant d'autres stations de mesure

Dans la partie 5.3.1, nous avons utilisé les réseaux de neurones afin d'essayer de prédire la pression d'impact des vagues sur la digue de l'Artha en utilisant des données qui proviennent d'autres stations. Ces données proviennent des stations suivantes :

- la station météo de Socoa,
 - le marégraphe de Socoa,
 - le houlographe 06403 - Saint-Jean-de-Luz (situé à 1km au large de la digue de l'Artha).
- La figure 5.1 montre la digue de l'Artha ainsi que les autres stations utilisées.

5.1.3 Prétraitement des signaux

Avant d'envisager un traitement automatisé des signaux enregistrés il est nécessaire de prétraiter les enregistrements. Comme nous l'avons présenté dans [3], il y a trois étapes importantes pour prétraiter les données :

1. Conversion des données en bars à l'aide de la loi de transfert des capteurs utilisés (équation 5.1),
2. Application d'un filtre non-linéaire (filtrage médian avec une fenêtre égale à 11) pour supprimer les artefacts,

3. Application d'un filtre linéaire pour garder les composantes du signal correspondant à la gamme de fréquence de réponse de nos capteurs $]0; 1kHz]$. Nous avons utilisé un filtre Butterworth passe-bas, où nous avons fixé la fréquence de coupure à $1kHz$ et l'ordre à 8.

5.1.4 Détection automatique des impacts

Nous souhaitons détecter chaque impact présent dans nos enregistrements afin de les isoler. Plusieurs approches ont été testées et nous avons finalement appliqué la méthodologie suivante :

- suppression de la composante continue,
- utilisation d'un seuil à $0.05bars$ et d'une durée minimale de dépassement.

L'algorithme développé a été testé sur un échantillon conséquent (environ 50 enregistrements de 10 minutes pris au hasard et présentant chacun en moyenne 30 impacts) et nous obtenons un taux de réussite proche de 100%. Cet algorithme met environ 40 secondes pour détecter les impacts sur les 16 capteurs pour un enregistrement de 10 minutes à $10kHz$.

5.2 Caractérisation des signaux d'impact de vagues

Afin de caractériser les impacts détectés dans les signaux, il est nécessaire de calculer différents critères (*features* en anglais) pour chaque impact, regroupés en deux catégories : les critères temporels et les critères liés à la pression.

5.2.1 Critères temporels

Les différents critères temporels sont représentés sur la figure 5.8.

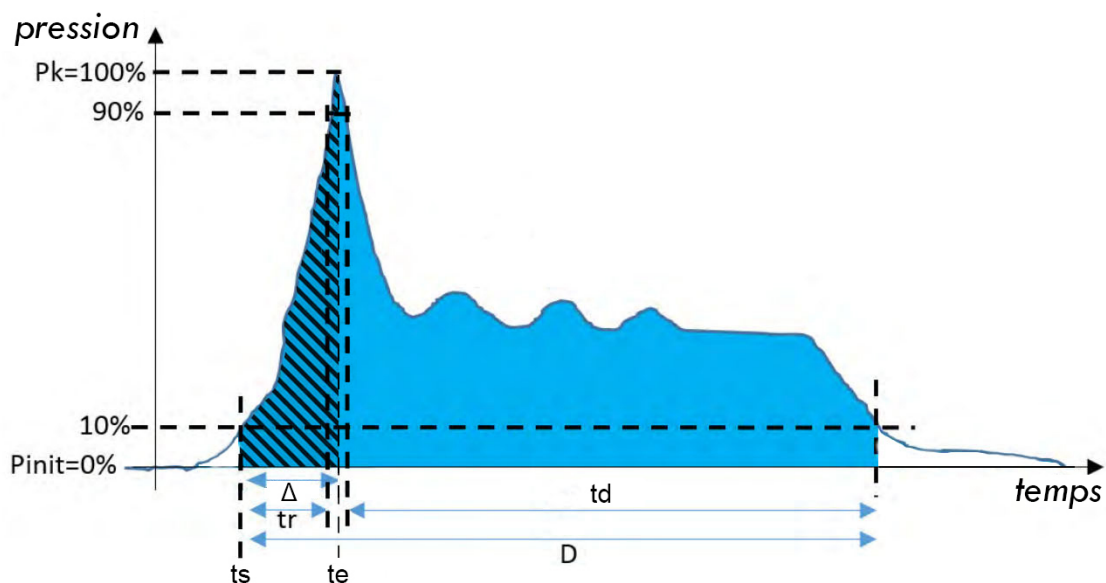


FIGURE 5.8 – Schématisation des critères.

Temps de montée t_r

Le temps de montée correspond à la durée que met le signal pour arriver à son maximum. Par convention, dans la discipline du traitement du signal, le temps de montée est calculé entre 10% du maximum et 90% du maximum.

Temps de descente t_d

Le temps de descente est la durée que met le signal pour redescendre à son minimum. Comme pour le temps de montée, il convient de le calculer entre 90% du maximum et 10% du maximum après le pic de pression.

Durée D

A l'instar du temps de montée et du temps de descente, la durée de l'impact correspond au temps écoulé entre le moment où le signal atteint 10% du maximum lors de sa montée le moment où il retombe à cette valeur lors de la descente.

Durée d'impulsion 2Δ

La durée d'impulsion 2Δ , où Δ correspond à peu près au temps de montée [5] :

$$2\Delta = 2(te - ts)$$

où ts (start) correspond au temps du début de l'impact percussif et te (end) au temps de fin de celui-ci.

5.2.2 Critères de pression**Maximum absolu P_k et maximum relatif**

Il s'agit de la valeur maximale enregistrée dans le signal d'impact (voir maximum sur la figure 5.8. Pour ce critère, il existe deux valeurs différentes : la valeur absolue du maximum et la valeur relative du maximum. La valeur absolue correspond à la valeur telle qu'elle est enregistrée par la station, c'est-à-dire en incluant la pression atmosphérique. La valeur relative quant à elle correspond à la valeur absolue moins la pression atmosphérique.

Intégrale

L'intégrale du signal d'impact est calculée dans le même intervalle de temps que celui utilisé pour calculer sa durée. Pour ce calcul nous utilisons le signal relatif, c'est-à-dire le signal auquel nous avons retiré la composante continue. La zone en bleu sur la figure 5.8 illustre ce critère.

Impulsion de pression

L'impulsion de pression correspond à l'intégrale de l'impact percussif. Il est possible de la calculer grâce à la formule suivante [6] [7] :

$$P(x, y) = \int_{ts}^{te} p(x, y, t) dt$$

où ts correspond au début de l'impact percussif (t à $0.1P_k$) et te au temps correspondant à P_k . La zone hachurée sur la figure 5.8 illustre l'impulsion de pression sur un impact.

Force linéique maximale

Dans [8], les auteurs ont étudié la distribution de la pression d'impact. Ils font l'approximation d'un profil linéaire dans un contexte moyenné pour tester la stabilité de l'ouvrage. Les mesures de pression que nous enregistrons sur la digue de l'Artha peuvent donc être utilisées pour connaître la force d'impact d'une vague sur la digue. Le calcul est réalisé en intégrant la distribution de pression verticale instantanée à l'aide de la méthode des trapèzes, supposant une linéarité de pression entre capteurs, grâce à la formule suivante :

$$F(x) = \sum_{i=0}^9 \int_{s_i}^{s_{i+1}} p(x) dx$$

Ici, nous avons 11 capteurs disposés sur l'axe vertical du Té. En prenant le capteur 0, ces onze capteurs sont positionnés comme décrit en table 5.1 et sur les figures 5.2 et 5.3. A noter que le capteur S0 n'est pas exactement aligné avec les capteurs S1..S10.

TABLE 5.1 – Coordonnées des capteurs verticaux en mètres.

s_0	s_1	s_2	s_3	s_4	s_5	s_6	s_7	s_8	s_9	s_{10}
0	1.85	2.05	2.25	2.45	2.65	2.85	3.05	3.25	3.45	3.65

La figure 5.9 montre la pression d'impact engendrée par une vague qui a touché les 11 capteurs situés sur l'axe vertical et la force associée.

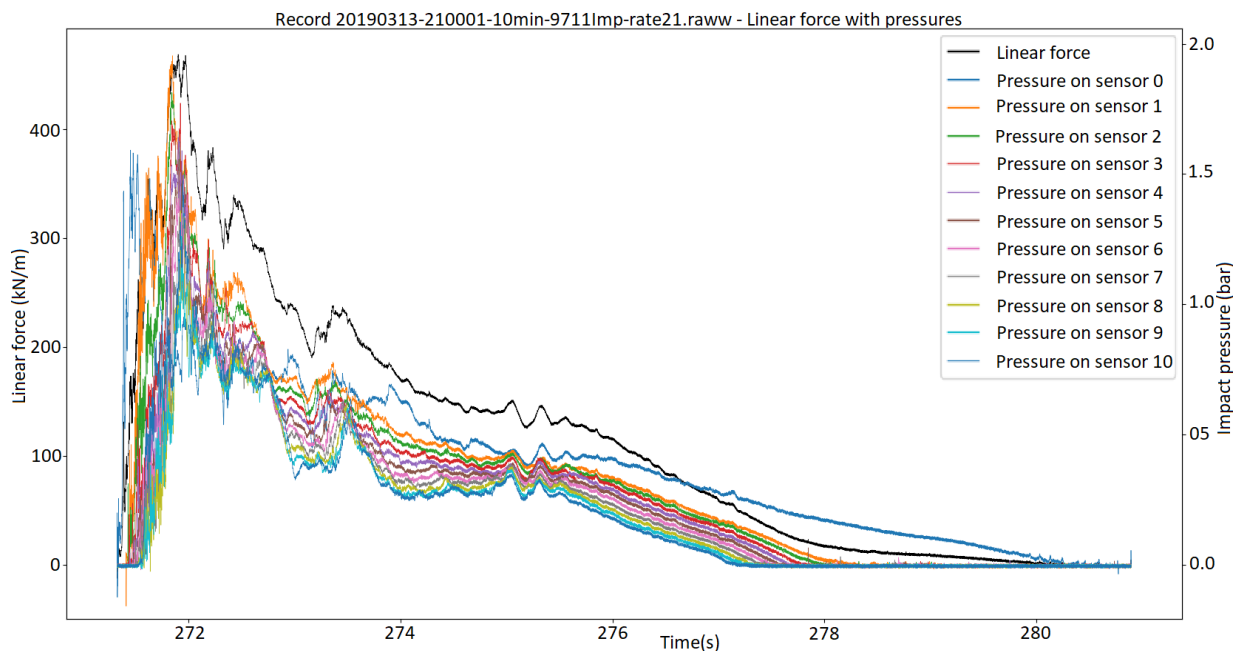


FIGURE 5.9 – Force linéique et pression d'impact sur les 11 capteurs de l'axe vertical.

5.2.3 Bases de données

Deux bases de données sont générées à partir de la détermination des critères :

- une base par impact pour caractériser chaque impact et en faire l'association sur l'ensemble des capteurs,

- une base par enregistrement afin de rassembler ces informations à une plus grande échelle temporelle.

Ce choix a notamment été fait pour permettre aux experts de sélectionner plus facilement et rapidement les enregistrements qui sont susceptibles d’être pertinents pour leurs études.

5.3 Caractérisation et classification des signaux

Afin de classer les impacts enregistrés il est nécessaire de recenser les différentes topologies identifiées en laboratoire ou sur des ouvrages réels. Plusieurs types d’impacts ont été identifiés précédemment [9], [10], [11] :

- *aerated impact* : la vague a été brisée et une masse d’eau aérée frappe le mur, cet impact se produit pour les vagues qui se brisent avant d’avoir atteint le mur,
- *air pocket impact* : au moment de l’impact, la crête de la vague frappe le mur, de telle manière qu’une bulle d’air se trouve piégée entre le mur et la vague,
- *flip through impact* : le creux de la vague et la crête de la vague se rencontrent au moment de l’impact sur le mur, de sorte que (presque) tout l’air a été expulsé de la poche d’air au moment de l’impact [12],
- *slosh impact* : la montée de la vague est plus élevée que la crête de la vague, de sorte que la crête de la vague frappe la couche d’eau au lieu du mur. Ce type d’impact se produit pour les vagues qui se briseraient loin derrière le mur.

La figure 5.10 schématise ces quatre types d’impacts. Cette figure permet de mieux imaginer et comprendre le moment du déferlement par rapport à une paroi ainsi que de visualiser la poche d’air piégée lors du *air pocket impact*.

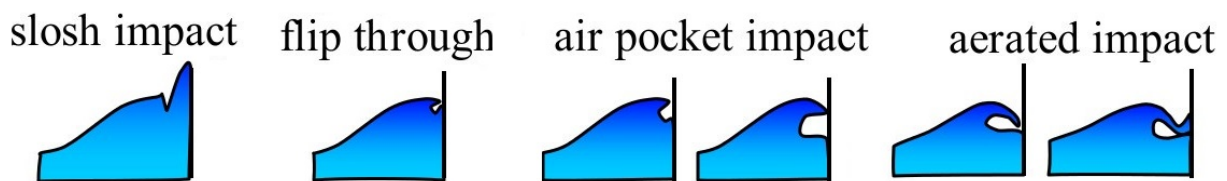


FIGURE 5.10 – Types d’impact des vagues en fonction du déferlement [13].

Kaminski *et al.* [14] en 2009 ont également étudié les impacts de vagues à grande échelle. Pour cela, des vagues ont été générées en canal, où là aussi elles percutaient un mur instrumenté permettant l’enregistrement de la pression d’impact des vagues.

Les signaux issus des différents types d’impacts sur un axe vertical sont disponibles en figure 5.11 : cela permet de visualiser le signal de pression d’impact pour chaque type d’impact, à différentes hauteurs du mur.

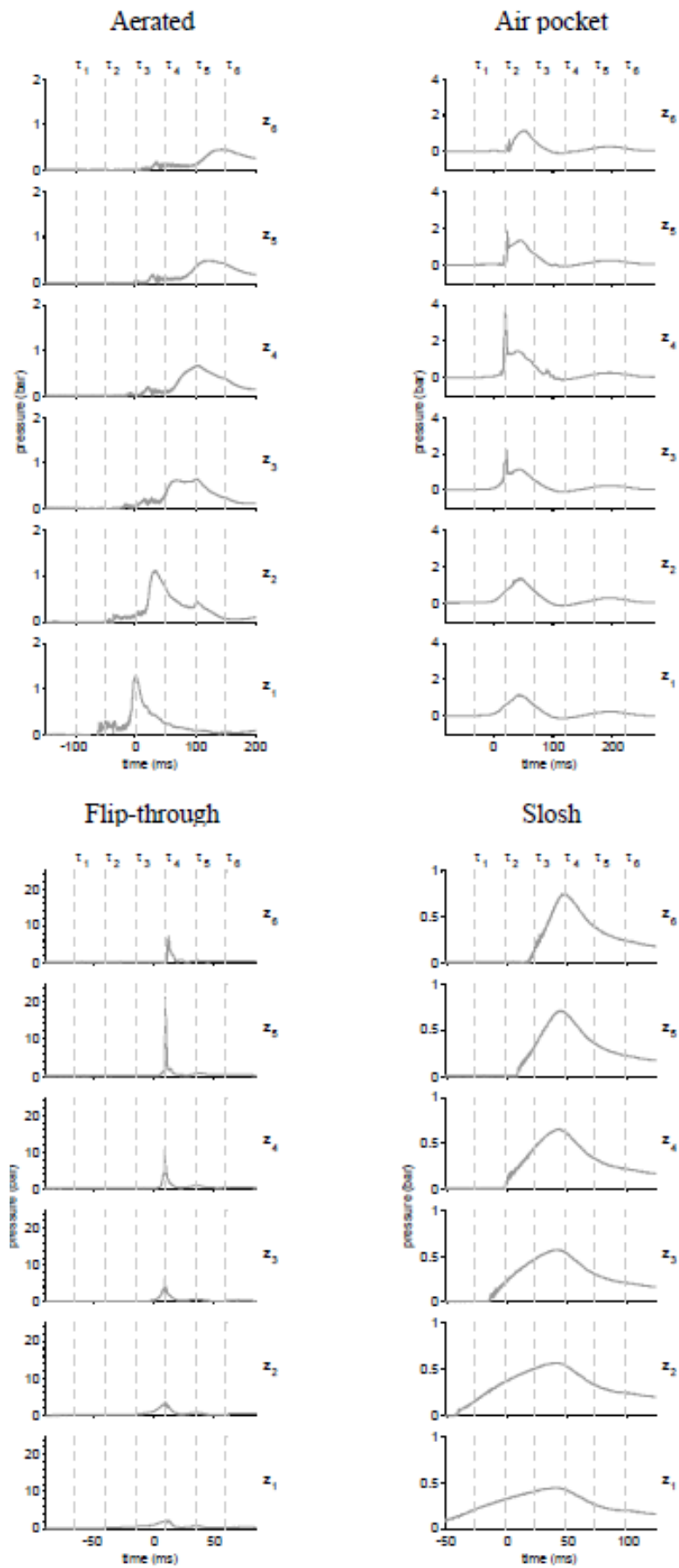


FIGURE 5.11 – Signal d'impact pour chaque type d'impact à différentes hauteurs d'une paroi [14].

Cette figure montre que chaque type d'impact a ses propres caractéristiques et donc l'allure d'un signal d'impact permet de déterminer visuellement de quel type d'impact il s'agit. En effet, nous pouvons observer des différences d'échelle et de durée. Le *flip through* génère la pression la plus élevée (environ 20bars) sur une durée très courte (environ 50 ms). Le deuxième type le plus puissant est le *air pocket* dont la pression monte jusqu'à 4 bars, avec une durée d'impact de 200 ms. L'*areated* est moins puissant, générant une pression de 2 bars et ayant une durée de 100 ms. Enfin, le *slosh* dure également 100 ms mais a une faible pression, de seulement 1 bar.

A partir des bases de données générées une classification et une caractérisation des impacts est possible. Pour ce faire nous utilisons différentes techniques issues du *data mining*. Plus particulièrement l'utilisation de la "découverte de connaissances dans les bases de données", abrégé en **KDD** (*Knowledge Discovery in Databases* en anglais), qualifie le processus général de la découverte de connaissances à partir de données.

Bien qu'il existe de nombreuses définitions du processus **KDD** ([15] [16] [17]), la plupart s'accordent sur les points essentiels. Les auteurs de [15] définissent le **KDD** comme un processus interactif et itératif. En effet, ils ont déterminé neuf étapes principales :

1. Identifier l'objectif du processus et rassembler les connaissances préalables nécessaires sur le domaine d'application.
2. Choisir un ensemble de données appropriées afin d'en extraire les connaissances souhaitées.
3. Prétraiter les données. Cela inclut la suppression du bruit introduit dans les données et/ou la suppression des données aberrantes ou erronées.
4. Réduire les données en un format pertinent et représentable. Cela peut passer par la suppression de paramètres inutiles pour l'objectif de la tâche.
5. Choisir une approche pour l'exploration des données en fonction de l'objectif défini lors du processus **KDD**.
6. Choisir l'algorithme le plus adapté pour répondre à l'objectif.
7. Appliquer l'algorithme sélectionné aux données prétraitées. L'algorithme permet la recherche de connaissance dans l'ensemble de données.
8. Interpréter les modèles dégagés par l'algorithme. Après cette étape, il est possible d'ajuster le processus **KDD** en revenant à l'une des étapes précédentes.
9. Utiliser les résultats pour d'autres objectifs.

5.3.1 Prévion de la pression d'impact des vagues

Nous utilisons la base de données par enregistrement, les données environnementales enregistrées au même moment provenant des autres stations présentées dans la partie 5.1.2.

L'article [2] présente le calcul d'un modèle linéaire multivarié en utilisant les données environnementales de vent, de vagues et de niveau d'eau. L'objectif était de déterminer les combinaisons des paramètres environnementaux engendrant des conditions favorables aux plus grandes pressions d'impact. Cette étude a permis de déterminer que ces variables expliquent 58% de la variabilité des données. Un test ANOVA de ce modèle multivarié a montré, comme prévu, que la variable la plus importante est la hauteur des vagues expliquant 45% de la variabilité totale. Le niveau d'eau explique quant à lui 8,5%, la direction de la houle seulement 3,7% et la période moins de 0,5% de la variabilité totale. L'influence du vent ne semble pas significative dans ce modèle. La figure 5.12 montre un graphique qui synthétise ces résultats.

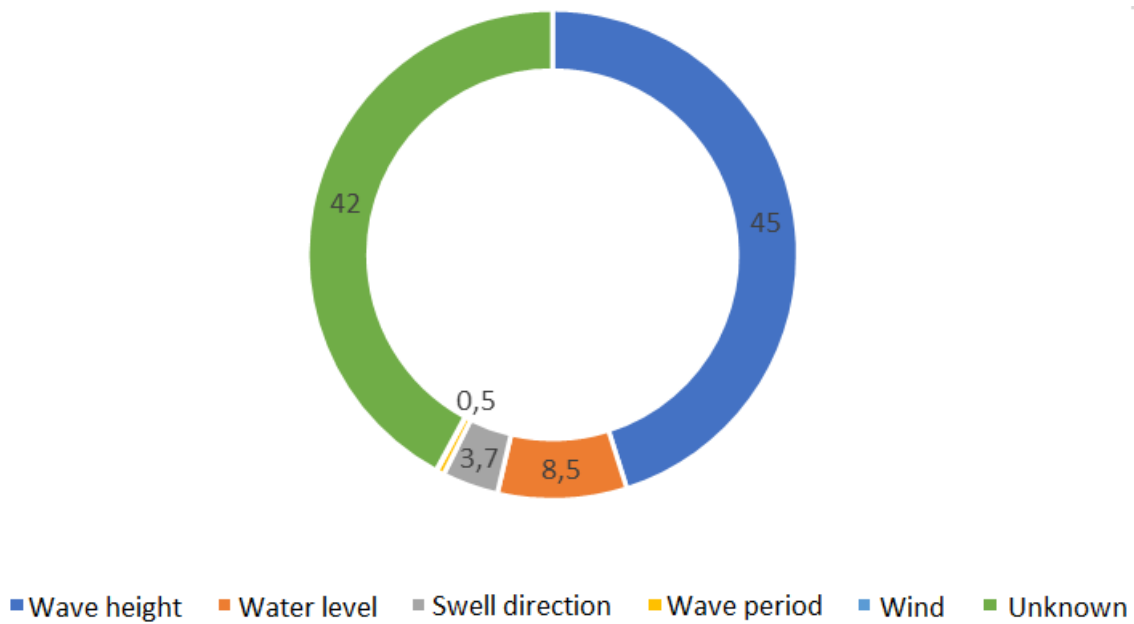


FIGURE 5.12 – Graphique représentant l’incidence de chaque variable environnementale sur la pression d’impact des vagues (en pourcentage).

Le machine Learning, le Deep Learning et plus globalement l’Intelligence Artificielle sont des méthodes d’apprentissage qui permettent d’identifier des corrélations délicates dans des ensembles de données pour lesquels l’analyse exploratoire n’a pas permis de déterminer correctement la forme du modèle sous-jacent. L’objectif n’est pas de donner une formule explicite pour la distribution des données, mais plutôt que l’algorithme détermine le modèle par lui-même, directement à partir des données. Le but du *ML* n’est donc pas d’arriver à une connaissance des données mais plutôt à un modèle exploitable et reproductible. De plus, le Machine Learning est inhérent à l’informatique et à l’optimisation, qui permet un apprentissage rapide sur de gros jeux de données.

Nous avons choisi d’utiliser les réseaux de neurones artificiels. Ces réseaux de neurones sont très bons pour les exercices de prévisions, ce que nous souhaitons réaliser à terme si ce premier modèle fonctionne.

Nous devons malheureusement conclure des résultats obtenus que le modèle que nous avons entraîné ne parvient pas à déterminer la pression d’impact des vagues grâce aux paramètres environnementaux locaux. En effet, ce modèle commet de trop grosses erreurs, qui le rend inutilisable. Cela rejoint les résultats obtenus dans [2], et confirme que d’autres paramètres entrent en compte pour déterminer la puissance d’impact des vagues.

Nous avons donc cherché à comprendre ce qui pouvait avoir un rôle sur la variation des pressions d’impacts.

5.3.2 Clustering des types d’impacts des vagues

Nous utilisons pour cette étude le processus **KDD** pour extraire de l’information permettant de regrouper les impacts afin d’établir différents *clusters*.

Comme nous l’avons vu dans la section précédente 5.3.1, il est complexe de déterminer la pression d’impact d’une vague en se basant seulement sur les données environnementales. Nous avons donc cherché à comprendre quels autres facteurs pouvaient engendrer cette variabilité, et nous avons fini par étudier les types d’impact des vagues. En effet, en fonction de la manière dont une vague déferle sur une structure, la pression appliquée par l’impact

sera plus ou moins forte.

Nous souhaitons réaliser un regroupement (*clustering*) de nos impacts sur la digue de l'Artha. Nous avons obtenu des résultats préliminaires, présentés dans [18], en n'utilisant que les plus gros impacts, ce qui ne concerne finalement que peu d'impacts. Cependant, il y a intérêt à établir des *clusters* sur un ensemble de données plus larges.

Nous avons choisi d'utiliser 4 algorithmes différents et de comparer les résultats obtenus :

- Hierarchical clustering
- SOM,
- DBSCAN,
- K-Means.

Résultats Hierarchical clustering

Le *clustering hiérarchique* [19] (en anglais, *hierarchical clustering*, également connu sous le nom de *hierarchical cluster analysis*) est un algorithme visant à regrouper des éléments similaires en *clusters*. Le résultat final est un ensemble de *clusters* distincts, au sein desquels les éléments présentent une forte similarité, tandis que les groupes eux-mêmes sont dissemblables.

Le clustering hiérarchique peut être appliqué soit à une matrice de distances, soit directement à des données brutes. L'algorithme débute en considérant chaque observation comme un *cluster* individuel. Il répète ensuite de manière itérative les deux étapes suivantes :

1. Identifier les deux *clusters* les plus proches,
2. Fusionner ces deux *clusters* en un seul.

Ce processus se poursuit jusqu'à ce que l'ensemble des *clusters* aient été fusionnés.

La sortie principale de cette méthode est un *dendrogramme*, qui représente les relations hiérarchiques entre les *clusters*. L'objectif principal de cette représentation est d'identifier la structuration optimale des données en groupes cohérents. L'interprétation d'un dendrogramme repose principalement sur la hauteur à laquelle deux éléments ou groupes sont fusionnés.

La délimitation des *clusters* finaux se fait en traçant une ligne horizontale à travers le dendrogramme (seuil de clusterisation). Les observations regroupées en dessous de cette ligne appartiennent alors au même *cluster*. Ce seuil, fixé par l'utilisateur, demeure subjectif et nécessite généralement plusieurs essais afin d'obtenir une partition pertinente et cohérente des données.

L'algorithme a permis d'obtenir le dendrogramme de la figure 5.13. Bien que plusieurs interprétations puissent être tirées de la figure 5.13, elles restent subjectives. Nous avons donc privilégié une approche plus objective, consistant à déterminer le nombre optimal de *clusters* en minimisant, une fois encore, la distance moyenne entre les observations et leur centroïde. Cette méthode nous a conduit à identifier cinq *clusters* comme solution optimale.

La distribution des impacts dans les *clusters* est la suivante :

- *cluster* 0 : 1612 impacts,
- *cluster* 1 : 687 impacts,
- *cluster* 2 : 158 impacts,
- *cluster* 3 : 199 impacts,
- *cluster* 4 : 456 impacts.

Afin d'examiner ces *clusters* il est intéressant de tracer les signaux des impacts. Nous avons analysé l'allure des signaux d'impacts par *cluster*, afin de voir si les signaux d'impacts appartenant à un même *cluster* avaient une allure similaire. La figure 5.14 permet de comparer les signaux moyennés de chacun des *clusters*. Il est difficile de différencier les impacts

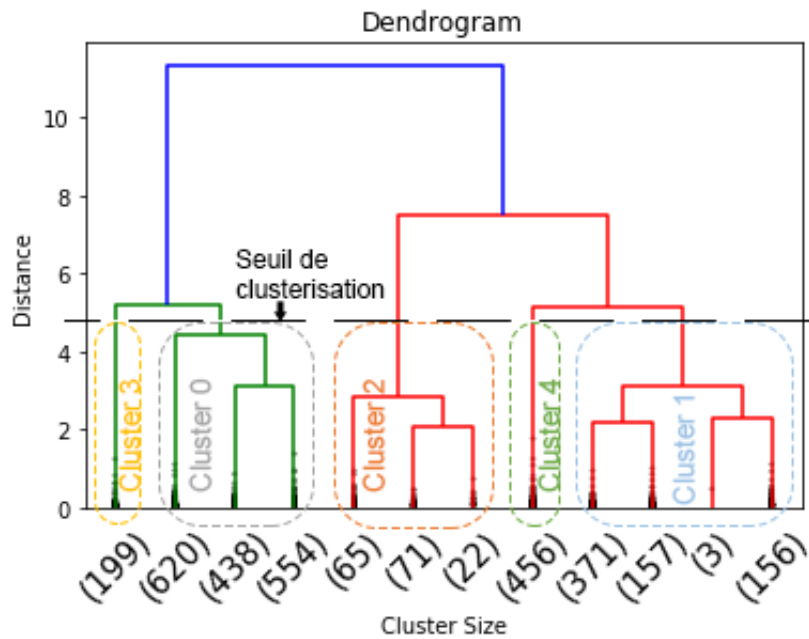
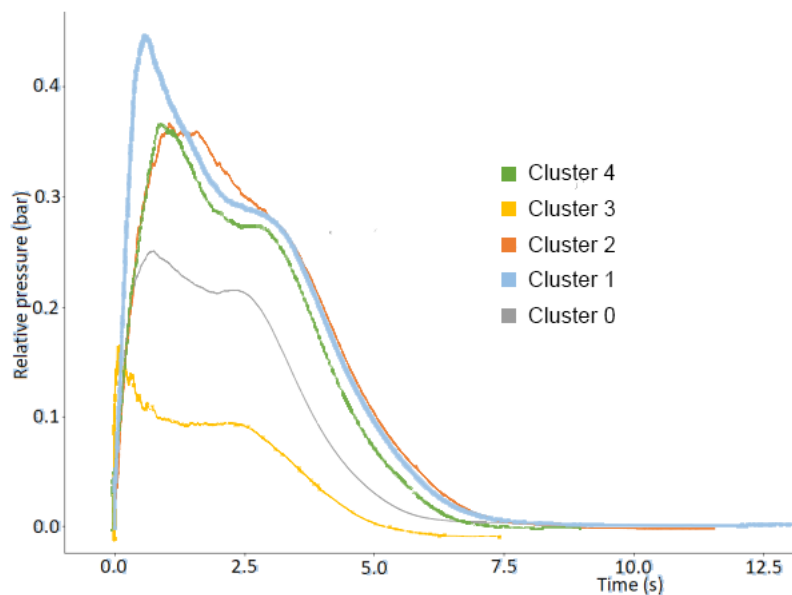


FIGURE 5.13 – Dendrogramme représentant le clustering des impacts.

FIGURE 5.14 – Comparaison des signaux moyennés de chaque *cluster* du *Hierarchical clustering*.

des *clusters* 1, 2 et 4 de manière visuelle. Pour ce qui est du *cluster* 3, nous observons que tous les impacts commencent directement par un pic, qui est bien souvent très court. Les signaux du *cluster* 0 ressemblent aux *clusters* 1, 2 et 4 avec pic de pression moins élevé.

Résultats de SOM

Une *Self-Organizing Map* [20], [21], souvent appelée *SOM* est une technique de clustering qui permet de découvrir des catégories dans de grands ensembles de données. Les *SOM*

sont un type de réseau de neurones artificiels qui est entraîné grâce à un apprentissage non-supervisé. L'objectif est de produire une représentation discrétisée de faible dimension (usuellement bidimensionnelle) de l'espace des *inputs* des échantillons d'apprentissage.

L'algorithme SOM aboutit à la carte de la figure 5.15(a). Sur cette figure, la couleur d'un neurone correspond à sa distance avec ses voisins. Plus un neurone sera proche de ses voisins, plus il sera blanc. À l'inverse, plus il sera éloigné de ses voisins, plus il sera noir.

Il est très compliqué d'interpréter une telle carte afin d'établir des *clusters*. Nous pouvons voir en bas à gauche de la carte, que tous les neurones sont très proches les uns des autres, et de ce fait appartiennent probablement au même *cluster*. Les quatre neurones très noirs sont quant à eux très loin de leurs voisins. Nous pouvons donc imaginer qu'ils représentent chacun un *cluster* différent. Le problème de cette carte est d'interpréter tous les autres neurones. Est-ce qu'ils appartiennent à un des *clusters* mentionnés juste avant ? Ou forment-ils de nouveaux *clusters* ? Ces questions sont complexes et il est difficile d'y répondre.

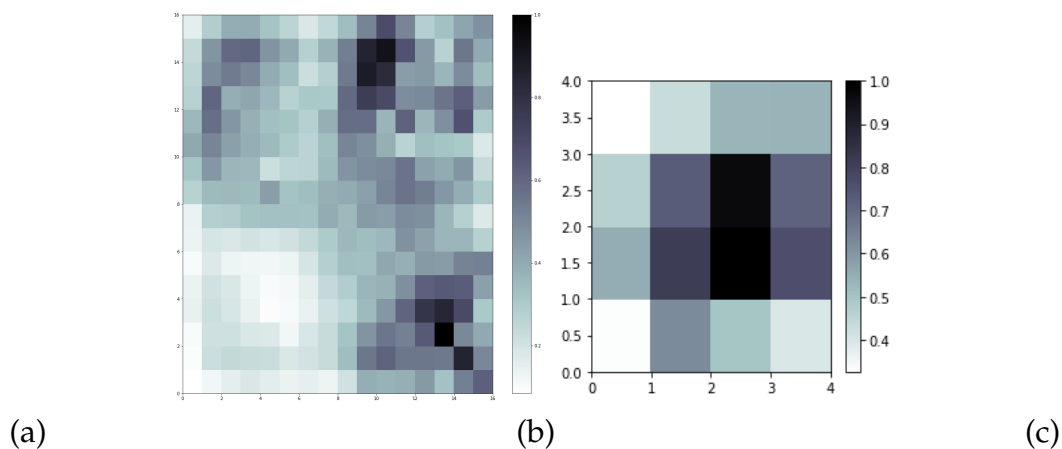


FIGURE 5.15 – Cartes obtenues par l'algorithme SOM. (a) 16 par 16. (b) 4 par 4.

De ce fait, nous avons voulu faire la même chose, mais en réduisant considérablement la taille de la carte. Nous avons donc choisi une carte de taille 4 par 4 5.15(b).

Après plusieurs tentatives de regroupement de neurones, aucun résultat pertinent n'a pu être obtenu par cette méthode.

Résultats DBSCAN

Le *Density-Based Spatial Clustering of Applications with Noise* [22], [23], plus connu sous le nom de *DBSCAN*, est un algorithme de clustering utilisé en exploration de données et en apprentissage non supervisé.

À partir d'un ensemble de points, DBSCAN regroupe ceux qui sont proches selon une distance (souvent euclidienne) et un nombre minimum de voisins. Les points isolés dans des zones peu denses sont identifiés comme des valeurs aberrantes.

L'algorithme repose sur deux paramètres :

- *eps* : la distance maximale pour qu'un point soit considéré comme voisin d'un autre.
- *minPts* : le nombre minimum de points requis pour former une région dense.

Avec ces paramètres, les points sont classés comme :

- *Point central* : au moins *minPts* voisins dans un rayon *eps*.
- *Point frontière* : voisin d'un point central mais avec moins de *minPts* voisins.
- *Valeur aberrante* : ni central, ni accessible depuis un point central.

DBSCAN permet de détecter des zones à forte densité en formant des *clusters* composés de points centraux connectés et de leurs points frontières. Un *cluster* doit contenir au moins un point central.

L'application de cet algorithme, sur notre jeu de données, n'a pas donné de résultats exploitables. La figure 5.16 fait apparaître un seul *cluster* d'impact (points en rouge) et plusieurs impacts considérés comme hors *cluster* (points en noir). Après ce résultat, nous avons essayé plusieurs paramétrages différents afin d'obtenir un meilleur clustering, cependant aucun résultat obtenu n'était pertinent.

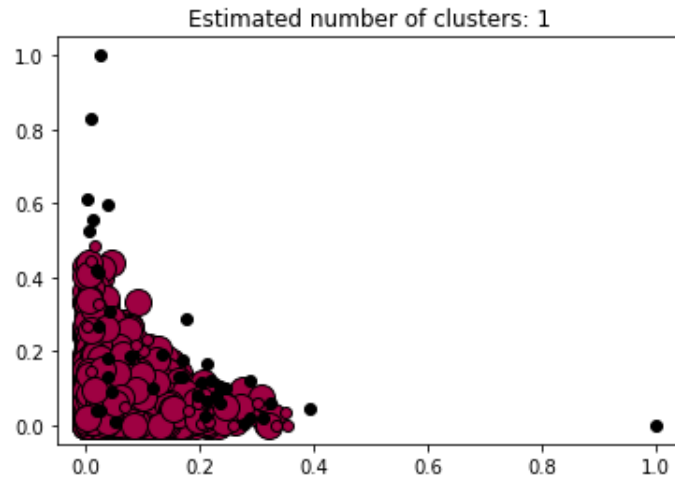


FIGURE 5.16 – Clustering obtenu avec l'algorithme DBSCAN.

Résultats K-Means

K-Means [24] est un algorithme de *clustering* fondé sur une méthode de quantification vectorielle, initialement développée dans le domaine du traitement du signal. Il a pour objectif de partitionner un ensemble de n observations en k *clusters*, de sorte que chaque observation soit associée au *cluster* dont le centroïde est le plus proche.

L'algorithme nécessite que le nombre de *clusters* k soit défini à l'avance. Une fois k spécifié, un processus itératif est engagé pour regrouper les données, selon les étapes suivantes :

- **Étape 0 (Initialisation)** : k points sont choisis aléatoirement dans l'espace, représentant les centroïdes initiaux des *clusters*.
- **Étape 1 (Affectation)** : chaque observation est assignée au centroïde le plus proche, ce qui permet une première partition des données en k *clusters*.
- **Étape 2 (Mise à jour)** : les centroïdes de chaque *cluster* sont recalculés à partir des observations qui leur sont assignées.
- **Étape 3 (Répétition)** : les étapes 1 et 2 sont répétées jusqu'à convergence, c'est-à-dire jusqu'à ce qu'aucune observation ne change de *cluster*.

À chaque itération, chaque point du jeu de données est affecté au centroïde le plus proche, puis les centroïdes sont recalculés et déplacés. Le processus continue ainsi jusqu'à stabilisation des affectations.

Les résultats obtenus et présentés précédemment ont permis de déterminer un nombre de *clusters* égal à 5. Il est alors possible d'utiliser l'algorithme K-Means.

La distribution des impacts dans les *clusters* est la suivante :

- *cluster* 0 : 235 impacts,
- *cluster* 1 : 415 impacts,
- *cluster* 2 : 1263 impacts,
- *cluster* 3 : 449 impacts,
- *cluster* 4 : 750 impacts.

A l'instar des autres méthodes de classification utilisées, la figure 5.17 montre les signaux moyennés de chaque *cluster* déterminés par la méthode du *K-Means*.

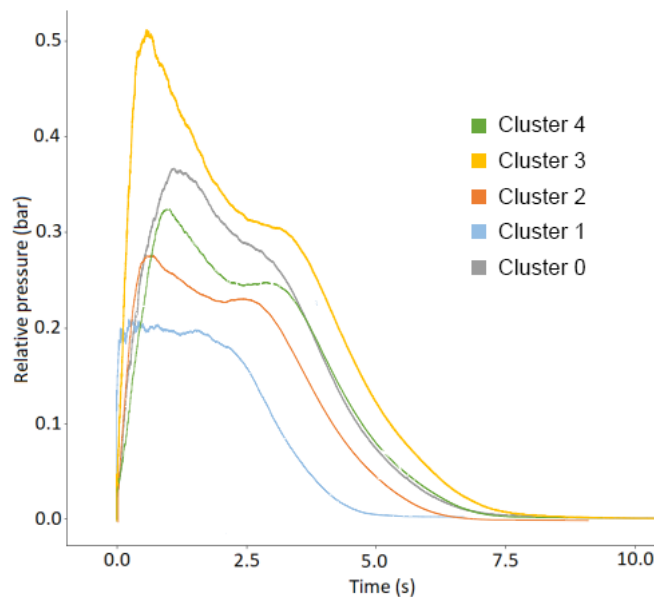


FIGURE 5.17 – Comparaison des signaux moyennés de chaque *cluster* du *K-Means*.

Bilan

Nous pouvons tirer plusieurs conclusions de cette étude. Tout d'abord, l'algorithme DBSCAN et le clustering via l'algorithme SOM ne s'est pas révélé adapté à notre jeu de données. En effet, ces deux méthodes n'ont pas permis de regrouper efficacement les impacts en différents *clusters* de manière pertinente.

En revanche, les résultats produits par les algorithmes *Hierarchical Clustering* et *K-Means* apparaissent plus cohérents et proches l'un de l'autre. Néanmoins, des divergences subsistent entre ces deux méthodes, rendant difficile le choix d'une solution optimale.

Par ailleurs, cette étude met en évidence que, malgré l'utilisation d'algorithmes de clustering, l'interprétation des résultats reste en partie subjective et donc discutable. Seul l'algorithme *K-Means* propose un résultat véritablement objectif.

Un des points faibles communs à ces regroupements est qu'aucun *cluster* n'est exclusivement composé d'impacts caractérisés par des pics très brefs, c'est-à-dire par des temps de montée et de descente rapides. Ce type d'impact est certes présent dans les données, mais il n'est isolé dans aucun groupe distinct, quel que soit l'algorithme utilisé.

Il est essentiel de rappeler que le clustering repose sur l'identification de similarités entre objets, en les regroupant selon des caractéristiques communes qui les distinguent des autres groupes. Ainsi, les résultats issus du clustering ne doivent pas être interprétés comme une classification stricte fondée sur des classes prédéfinies, lesquelles permettent généralement une distinction plus précise.

5.3.3 Travaux connexes

Association d'impacts

Bien souvent, les experts souhaitent visualiser un impact particulier et l'identifier sur l'ensemble des capteurs. Jusqu'à lors, l'expert devait ouvrir les signaux correspondants pour chaque capteur, et en extraire la partie qui correspond à l'impact qu'il a préalablement sélectionné.

Afin de faciliter ce travail fastidieux, nous avons voulu associer les impacts sur les différents capteurs qui correspondent à la même vague. En utilisant simplement l'inclusion et l'intersection temporelle entre les signaux des différents capteurs, on est capable d'associer les impacts correspondant à la même vague.

De ce fait, on a quatre cas de figure :

- L'impact du capteur A est inclus dans l'impact du capteur B.
- L'impact du capteur A inclut l'impact du capteur B.
- Il existe une intersection entre la fin de l'impact du capteur A et le début de l'impact du capteur B.
- Il existe une intersection entre le début de l'impact du capteur A et la fin de l'impact du capteur B.

Cela permet donc d'enregistrer directement dans la base de données, pour un impact sur un capteur, les identifiants des impacts qui sont liés à la même vague sur les autres capteurs. En effet, en utilisant un dictionnaire, il est simple d'enregistrer l'identifiant de l'impact associé par capteur, comme le montre l'exemple du tableau 5.2.

TABLE 5.2 – Exemple d'une table associant l'impact numéro 1034 sur les autres capteurs verticaux.

Capteur	1	2	3	4	5	6	11	12	13	14	15
ID de l'impact	1034	1043	1051	1057	1061	1065	1071	1073	1075	1078	1080

Dans ce dictionnaire nous observons que l'impact que nous analysons est associé à l'impact 1034 qui a lieu sur le capteur 1, l'impact 1043 qui a lieu sur le capteur 2, et ainsi de suite.

Visualisation vidéo de la pression d'impact sur les capteurs

La figure 5.18 montre un impact de vague sur la digue de l'Artha qui a impacté les 16 capteurs de la station. Il est complexe, en observant cette figure, de visualiser le déferlé sur la digue. Nous avons conçu un algorithme permettant de générer deux types de vidéos facilitant la visualisation des signaux :

- Évolution linéaire de la pression d'impact : la vidéo générée affiche pour chaque pas de temps, la valeur de la pression d'impact de chaque capteur sur l'axe vertical du Té (voir la figure 5.19 et la vidéo correspondante¹)
- Évolution 2D de la pression d'impact : la vidéo générée permet de visualiser la pression d'un impact sur les 16 capteurs. (voir la figure 5.20 et la vidéo correspondante²)

1. Evolution linéaire de la pression d'impact <https://www.youtube.com/watch?v=DW0UsGh0Sj8>

2. Évolution 2D de la pression d'impact <https://www.youtube.com/watch?v=9oqdKYHHCfc>

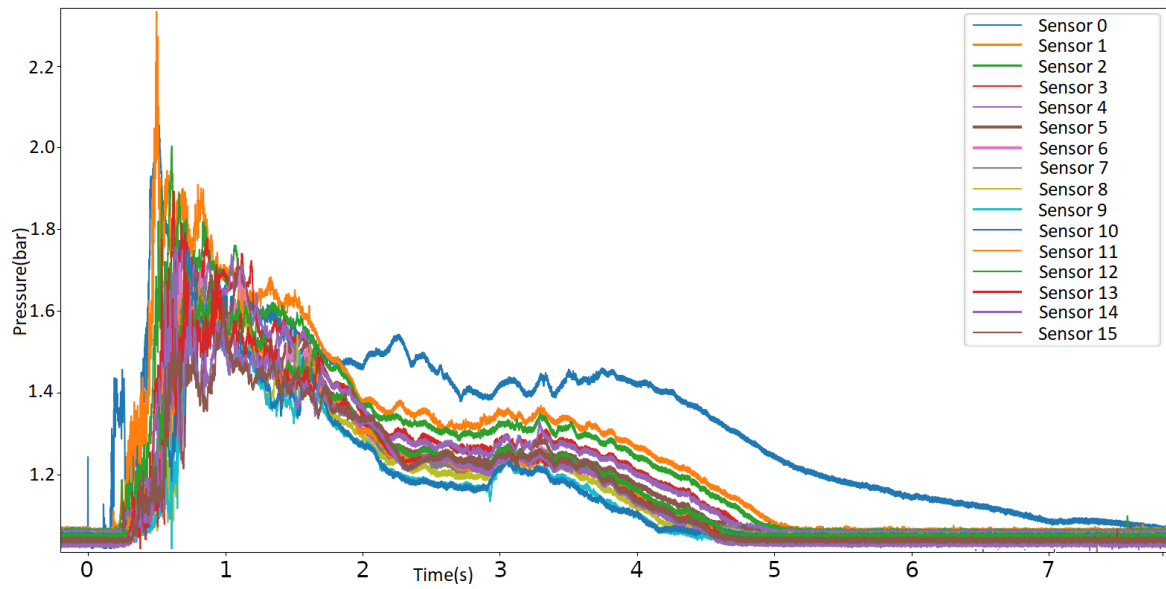


FIGURE 5.18 – Impact d’une vague sur les 16 capteurs de la digue de l’Artha.

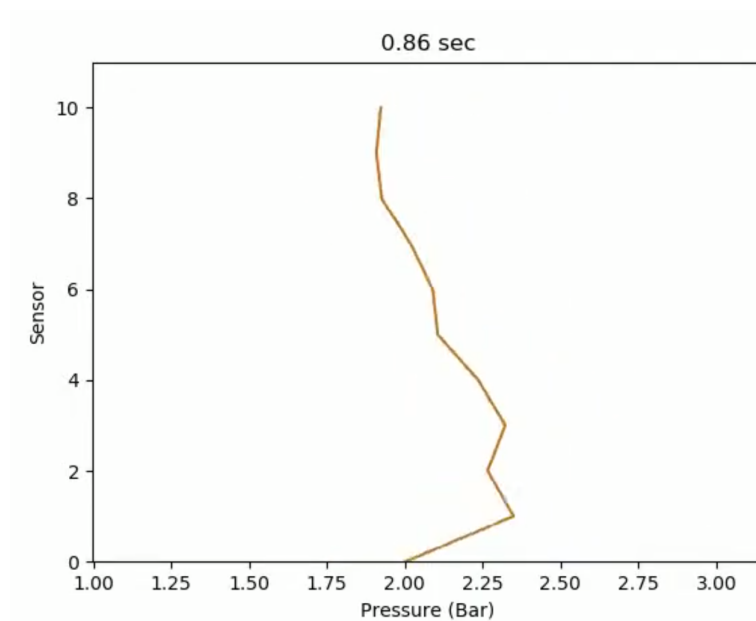


FIGURE 5.19 – Capture de la vidéo à 0.86 seconde : graphique permettant la visualisation linéaire verticale de la pression sur les capteurs

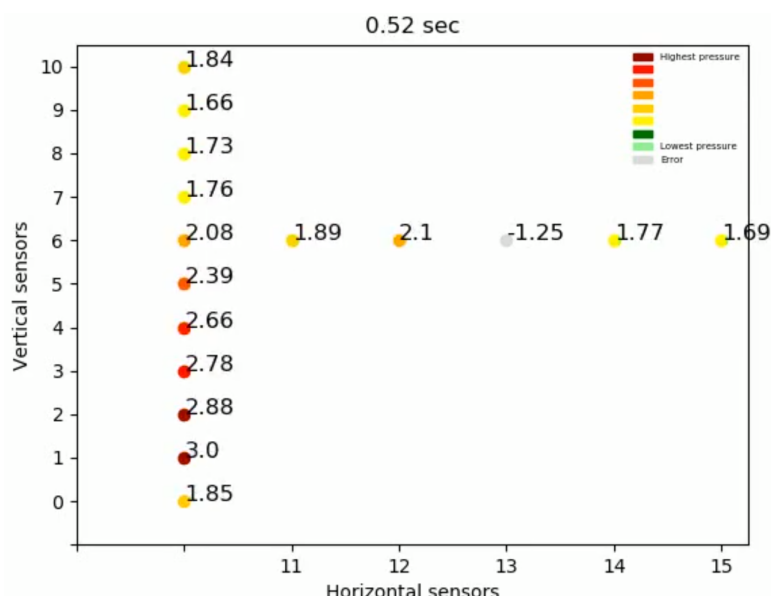


FIGURE 5.20 – Capture de la vidéo à 0.52 seconde : graphique permettant la visualisation 2D de la pression sur les capteurs. La valeur à côté de chaque capteur correspond à la pression sur le capteur en bar.

5.4 Traitement de signaux d'accélérométrie pour l'étude comportementale de poissons

5.4.1 Objectif

En 2016, j'ai codirigé avec Franck Luthon le stage de Master 2 de Frédéric Bertin [25]. L'objectif de ces travaux est de contribuer à l'analyse de signaux de biotélémetrie (accélérométrie, pression, température, luminosité) dans le cadre d'une collaboration entre le laboratoire ECOBIOP et le LIUPPA. Plus précisément, il s'agit de traiter les données issues de capteurs placés sur des aloses afin de détecter certains comportements, notamment celui de la reproduction, caractérisé par un mouvement nocturne circulaire en surface appelé *bull*.

Le travail consiste à isoler les séquences de signaux pertinentes et à interpréter leur signification biologique. Bien que centré sur l'étude de l'aloise, ce travail vise à rester suffisamment générique pour être réutilisable sur d'autres espèces, dans le but d'identifier des comportements tels que la prédation, la reproduction ou la migration.

5.4.2 Les biologgers

Les *biologgers* utilisés par le laboratoire ECOBIOP sont des capteurs développés par l'unité MIBE (Métrologie et Instrumentation en Biologie et Environnement). Cette unité fournit aux biologistes des équipements adaptés à leurs contraintes expérimentales (Fig. 5.21).

Le capteur utilisé possède les caractéristiques décrites dans le tableau 5.3.

Les capteurs enregistrent localement les données. Leur récupération physique pose parfois problème en milieu naturel.

Malgré cette contrainte, les biologgers offrent une acquisition précise et continue.

L'interprétation des fichiers CSV volumineux reste un défi majeur pour les biologistes. Une application informatique développée en Java doit permettre de charger ces fichiers CSV et d'analyser les données issues de l'accéléromètre afin de détecter les *bulls*.

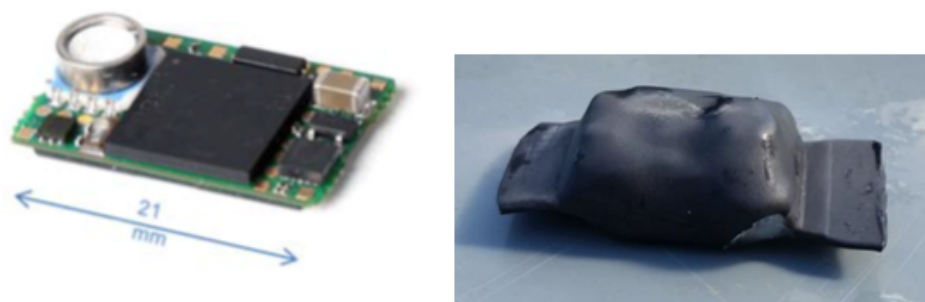


FIGURE 5.21 – Biollogger sans et avec enveloppe protectrice implanté sur l'arête dorsale du poisson.

TABLE 5.3 – Caractéristiques du biollogger

Relevé	Amplitude	Précision	Résolution	Échantillonnage
Température	-35°C à 65°C	$\pm 0,5^{\circ}\text{C}$	$0,02^{\circ}\text{C}$	1Hz
Pression	Jusqu'à 30 m ou 50 m	± 30 cm ou ± 5 cm	—	1Hz
Luminosité	0,045 lux à 188 000 lux	—	—	1Hz
Accéléromètre	± 2 g, ± 4 g, ± 8 g, ± 16 g	1 à 12 mG	1 à 12 mG	50Hz

Un travail préliminaire a permis de visualiser une vidéo filmée dans un bassin synchronisée avec les signaux de l'accéléromètre du capteur. Une image extraite de la séquence vidéo est disponible en figure 5.22. La vidéo de cette expérience est également disponible³.

5.4.3 Les huit étapes de traitement de l'application

L'analyse des données fournies par l'accéléromètre placé sur un poisson se décline en huit étapes principales allant du prétraitement à l'exploitation comportementale :

1. **Extraction des données brutes** : les données sont fournies sous forme de fichier CSV volumineux (jusqu'à 21 Go), contenant des millions de lignes. Une base de données est donc créée pour ne conserver que les périodes pertinentes (marquage du poisson).
2. **Recalage temporel** : le capteur présente une dérive temporelle, estimée par régression linéaire ($f(t) = at + b$), afin de synchroniser les données avec les vidéos.
3. **Vérification par vidéo** : une interface permet de vérifier visuellement la cohérence entre les courbes de données et les enregistrements vidéo (s'ils sont disponibles).
4. **Calcul du module** : le module du vecteur d'accélération est calculé à chaque instant pour détecter les phases d'activité du poisson.
5. **Réalignement gravitationnel** : les données sont réorientées par un changement de repère, via trois rotations successives, afin d'aligner l'axe vertical du capteur avec la gravité.
6. **Posture du poisson** : les angles d'orientation du poisson sont calculés à partir des composantes de l'accélération comparés à l'orientation de l'accélération gravitationnelle.
7. **Détection de mouvements** : les phases de mouvement sont identifiées via un seuil sur le module et des contraintes de durée, afin de repérer notamment les comportements reproducteurs.

3. Vidéo d'une truite équipée du capteur https://youtu.be/yuisxm_BBFc

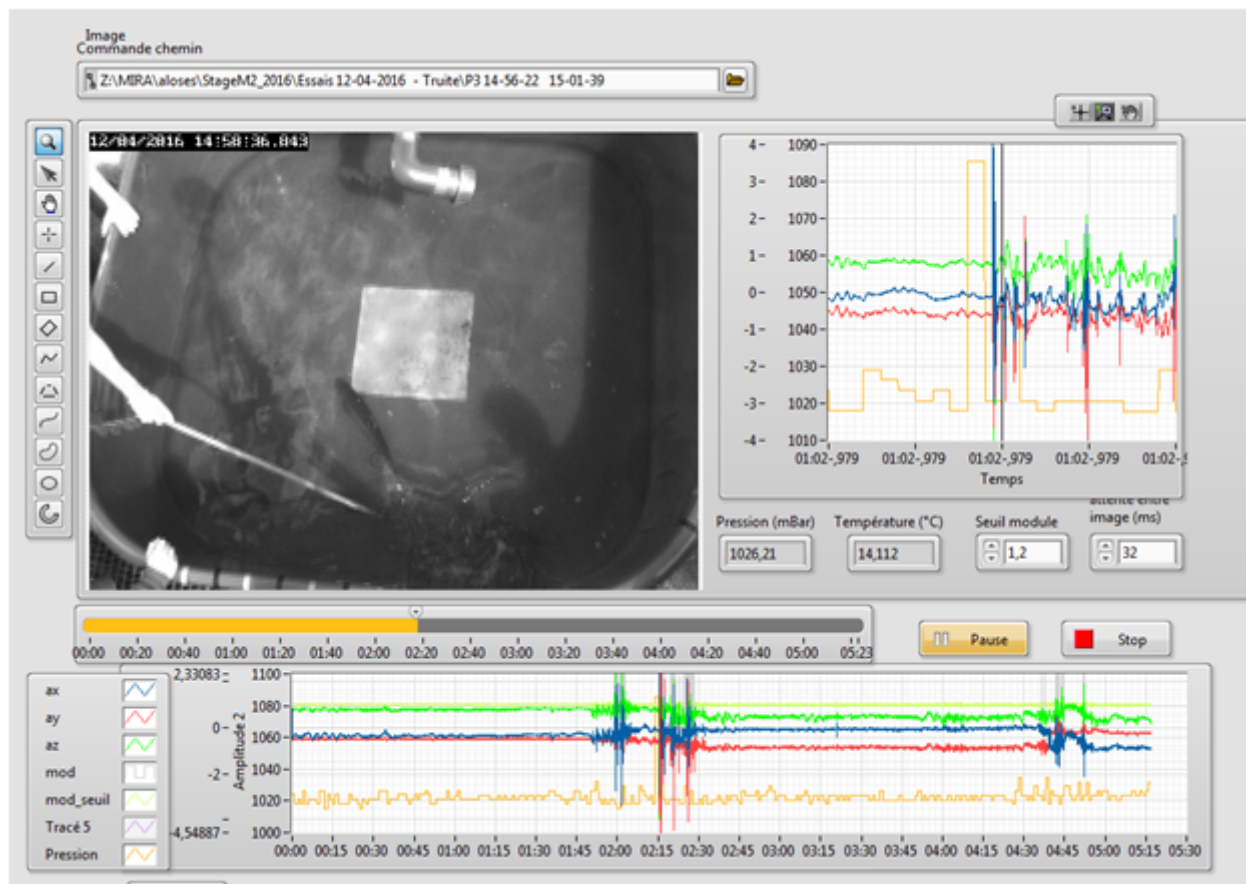


FIGURE 5.22 – Extrait de la vidéo d’une truite équipée du biollogger synchronisant la vidéo et les signaux issus du biollogger. En haut à gauche : la vidéo, en bas : les signaux issus du biollogger, en haut à droite : un zoom sur le graphique du bas.

8. **Visualisation** : l'ensemble de ces traitements est intégré dans une application facilitant l'interprétation des données issues des capteurs.

5.4.4 Résultats

Afin de fiabiliser la détection automatique des *bulls* il a été nécessaire de disposer d'une expérience permettant d'attester la présence de *bull* dans le jeu de données. Ainsi des biologistes ont placé dans un bassin des aloses équipées de biollogger. Par une observation visuelle, ils ont pu noter les heures d'occurrence des *bulls*. Ainsi, avec l'application développée nous avons pu comparer la détection des mouvements basée sur les signaux d'accélérométrie afin de détecter un *pattern* correspondant au *bull* (voir figure 5.23) et d'exclure de la détection les autres mouvements de l'aloise.

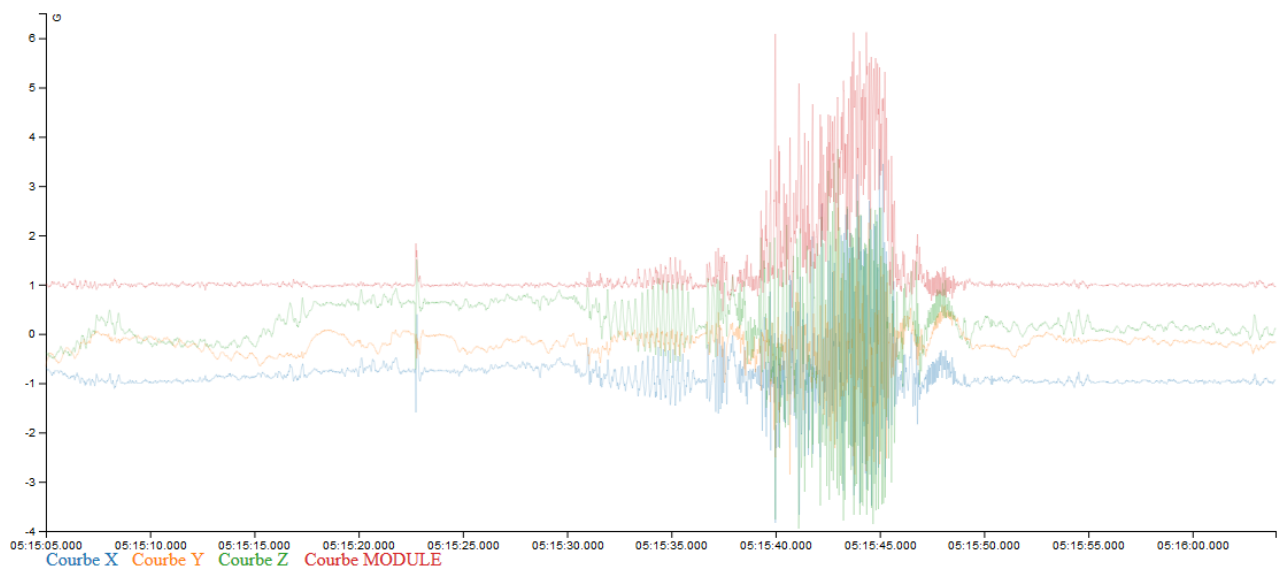


FIGURE 5.23 – Signaux d'accélérométrie issus du biollogger lors d'un *bull*.

Grâce à cette "vérité terrain" nous avons pu nous apercevoir que la phase de détection devait être optimisée. En effet, cette détection est uniquement basée sur l'établissement d'un seuil et de la durée de dépassement de celui-ci. Comme le montre la figure 5.24, cette méthode de détection simple génère malheureusement de nombreux faux positifs et il serait alors nécessaire de travailler sur le *pattern* du signal en accélérométrie d'un *bull* afin de détecter l'occurrence de ces *patterns*.

5.5 Perspectives

Pour faciliter la visualisation et la recherche, nous souhaitons utiliser une plateforme de Big Data. Une telle plateforme aurait un double intérêt. Le premier est de faciliter tous les traitements présentés auparavant. Le deuxième est de pouvoir établir une base de données consultable en ligne avec la possibilité de visualiser les signaux et certains phénomènes physiques remarquables (impacts dans le cas d'étude de la digue de l'Artha et *bull* dans le cas d'étude des aloses). Concernant l'applicatif de suivi des impacts de vague, le déploiement de ce dispositif expérimental (voir section 7.2) est en cours sur :

- des sites naturels, typiquement des falaises à Bonifacio en Corse et sur la côte Basque afin d'étudier l'érosion due aux changements climatiques et à l'augmentation de l'occurrence des vagues extrêmes.

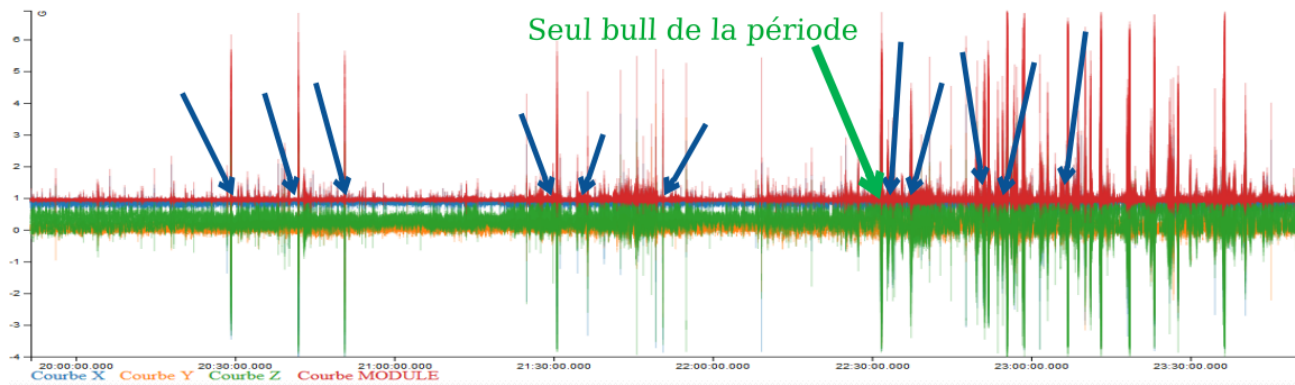


FIGURE 5.24 – Image issue de l’IHM de l’application faisant apparaître un *bull* (flèche verte) et des faux positifs (flèches bleues).

— des stations mobiles de mesures d’impact lors de vagues submersives.

De plus, nous avons installé une station de captation vidéo sur le fort de Socca afin de filmer les déferlements ayant lieu sur la digue de l’Artha. L’analyse des vidéos enregistrées nous permettra d’avoir un retour visuel sur les formes des vagues et grâce à des techniques de vision par ordinateur d’obtenir plus d’informations pour classer les impacts.

Les travaux liés aux traitements des signaux issus de la station de mesure de la digue de l’Artha ont conduit à diverses publications dans des journaux scientifiques [3, 2, 18, 26] et dans des conférences internationales [27, 28, 29].

Les travaux liés aux traitements des signaux d’accélérométrie pour caractériser le comportement des poissons ont conduit à diverses communications dans des conférences nationales [30, 31].

Références personnelles

- [2] B. LARROQUE, P. ARNOULD, F. LUTHON, P.-A. PONCET, A. RAHALI et S. ABADIE. « In-situ measurements of wave impact pressure on a composite breakwater : preliminary results ». In : *Journal of Coastal Research* (2018), p. 1086-1090.
- [3] F. LUTHON, D. D'AMICO et B. LARROQUE. « Embedded Sensors in Coastal Structures for On-Site Wave Impact Pressure Monitoring ». In : *IEEE Access* 6 (2018), p. 56135-56141.
- [18] D. D'AMICO, B. LARROQUE, F. LUTHON, P.-A. PONCET et S. ABADIE. « Continuous measurement and automatic processing of in-situ wave impact pressure data ». In : *Journal of Coastal Research* 95.sp1 (2020), p. 214-219.
- [26] P. PONCET, B. LIQUET, B. LARROQUE, D. D'AMICO, D. SOUS et S. ABADIE. « In-situ measurements of energetic depth-limited wave loading ». In : *Applied Ocean Research* 125 (2022). DOI : [10.1016/j.apor.2022.103216](https://doi.org/10.1016/j.apor.2022.103216).
- [27] F. LUTHON, D. D'AMICO et B. LARROQUE. « Embedded Sensors in Coastal Structures for On-Site Wave Impact Pressure Monitoring ». In : *Int. Academic Conf. on Engineering, Technology and Innovations (IACETI 2018)* Santiago.Chile (2018), 16-17th July.
- [28] D. D'AMICO, B. LARROQUE, F. LUTHON, P.-A. PONCET et S. ABADIE. « Continuous measurement and automatic processing of in-situ wave impact pressure data ». In : *International Coastal Symposium (ICS 2020)* Seville.Spain (2020), 20-23th April.
- [29] E. IMBERTIE, D. MORICHON, M. DELPEY, B. LARROQUE et C. LAVAYSSIÈRE. « Field measurement of impact pressures on a vertical structure generated by overtopping waves on a shallow foreshore ». In : *38th International Conference on Coastal Engineering*, Roma, Italia. 2024.
- [30] J.-C. AYMES et al. « Accélérométrie et comportement reproducteur des poissons : utilisation de capteurs embarqués pour la détection des "bulls" chez la grande alose ». In : France, 2020.
- [31] C. TENTELIER et al. « Vers une détection automatique de la ponte des aloses par accélérométrie ». In : *Journée plénière de la Fédération de Recherche MIRA*. Anglet, France, déc. 2016.

Références

- [1] A. RAHALI. « Analyse des données issues des enregistrements des impacts réels des vagues sur la digue d'Artha ». Projet de fin d'études, École Nationale d'Ingénieurs de Tunis. 2017.
- [4] *National Instruments*. URL : <https://www.ni.com> (visité le 23/09/2020).
- [5] R. BAGNOLD. « Interim report on wave-pressure research. » In : *Journal of the Institution of Civil Engineers* 12.7 (1939), p. 202-226.
- [6] J. L. de LAGRANGE. « Mémoire sur la théorie du mouvement des fluides ». In : *Oeuvres complètes* 695 (1781).
- [7] M. COOKER et D. PEREGRINE. « A model for breaking wave impact pressures ». In : *Coastal Engineering* 1990. 1991, p. 1473-1486.
- [8] Y. GODA. « New wave pressure formulae for composite breakwaters ». In : *Coastal Engineering* 1974. 1975, p. 1702-1720.

- [9] H. OUMERACI et al. *Probabilistic design tools for vertical breakwaters*. CRC Press, 2001.
- [10] P. HULL et G. MÜLLER. « An investigation of breaker heights, shapes and pressures ». In : *Ocean Engineering* 29.1 (2002), p. 59-79.
- [11] G. BULLOCK, C. OBHRAI, D. PEREGRINE et H. BREDMOSE. « Violent breaking wave impacts. Part 1 : Results from large-scale regular wave tests on vertical and sloping walls ». In : *Coastal Engineering* 54.8 (2007), p. 602-617.
- [12] D. PEREGRINE. « Water-wave impact on walls ». In : *Annual review of fluid mechanics* 35.1 (2003), p. 23-43.
- [13] B. HOFLAND, M. KAMINSKI et G. WOLTERS. « Large scale wave impacts on a vertical wall ». In : *Coastal Engineering Proceedings* 1.32 (2010), p. 15.
- [14] M. L. KAMINSKI, H. BOGAERT et al. « Full scale sloshing impact tests ». In : *The Nineteenth International Offshore and Polar Engineering Conference*. International Society of Offshore et Polar Engineers. 2009.
- [15] U. FAYYAD, G. PIATETSKY-SHAPIO et P. SMYTH. « From data mining to knowledge discovery in databases ». In : *AI magazine* 17.3 (1996), p. 37-37.
- [16] J. H. FRIEDMAN. « Data mining and statistics : What's the connection ? » In : *Computing Science and Statistics* 29.1 (1998), p. 3-9.
- [17] O. MAIMON et L. ROKACH. « Data mining and knowledge discovery handbook ». In : (2005).
- [19] G. J. SZEKELY et M. L. RIZZO. « Hierarchical Clustering via Joint Between-Within Distances : Extending Ward's Minimum Variance Method. » In : *Journal of classification* 22.2 (2005).
- [20] A. VELLIDO, K. GIBERT, C. ANGULO et J. D. M. GUERRERO. *Advances in Self-Organizing Maps, Learning Vector Quantization, Clustering and Data Visualization : Proceedings of the 13th International Workshop, WSOM+ 2019, Barcelona, Spain, June 26-28, 2019*. T. 976. Springer, 2019.
- [21] T. KOHONEN. « Exploration of very large databases by self-organizing maps ». In : *Proceedings of international conference on neural networks (icnn'97)*. T. 1. IEEE. 1997, PL1-PL6.
- [22] M. ESTER, H.-P. KRIEGEL, J. SANDER, X. XU et al. « A density-based algorithm for discovering clusters in large spatial databases with noise. » In : *Kdd*. T. 96. 34. 1996, p. 226-231.
- [23] K. KHAN, S. U. REHMAN, K. AZIZ, S. FONG et S. SARASVADY. « DBSCAN : Past, present and future ». In : *The fifth international conference on the applications of digital information and web technologies (ICADIWT 2014)*. IEEE. 2014, p. 232-238.
- [24] J. MACQUEEN et al. « Some methods for classification and analysis of multivariate observations ». In : *Proceedings of the fifth Berkeley symposium on mathematical statistics and probability*. T. 1. Oakland, CA, USA. 1967, p. 281-297.
- [25] F. BERTIN. « Traitement de données d'accélérométrie pour l'étude comportementale des poissons ». Master Sciences, Technologies, Santé, Mention Informatique, Spécialité SIGLIS, Stage de 2^e année. 2016.

Sommaire

6.1	Introduction	100
6.2	Supervision logicielle et instrumentation	100
6.2.1	Systèmes physiques, télémessure, télécontrôle et automatisation	100
6.2.2	Stockage des données et interopérabilité	101
6.2.3	Accès distant et défis sécuritaires	101
6.2.4	Données et logiciels FAIR	101
6.2.5	Catégories de logiciels	102
6.2.6	Interopérabilité	103
6.2.7	FAIR et Supervision	103
6.2.8	Différentes interopérabilités	104
6.2.9	Choix d'un système de supervision	104
6.3	Logiciel PyScada	106
6.3.1	Présentation	106
6.3.2	Abstractions	106
6.3.3	Présentation de PyScada	106
6.3.4	Django	107
6.3.5	Cœur de PyScada	108
6.3.6	Couche d'abstraction matérielle	109
6.3.7	Interfaces web	110
6.3.8	Synthèse	111
6.4	Exemples d'application	112
6.4.1	Laborem	113
6.4.2	Supervision d'ouvrages du littoral	114
6.4.3	Digue de l'Artha	114
6.4.4	Réseau Sirena	116
6.4.5	Suivi énergétique du bâtiment	117
6.5	Conclusion	119
	Références personnelles	120
	Références	120

6.1 Introduction

Depuis la fin du XX^{ème} siècle, la présence de l'informatique dans l'enseignement supérieur, plus particulièrement dans les sciences et techniques de l'ingénieur, la recherche et l'industrie a permis aux travailleurs (étudiants, enseignants, chercheurs, techniciens et ingénieurs) d'avoir des outils d'acquisition de données (mesure, alarme, retour d'état de fonctionnement) et de paramétrage des processus (contrôle, configuration). Les logiciels ont été dans un premier temps conçus pour un type d'application, ils sont parfois dédiés à un domaine particulier et ne peuvent représenter qu'une partie d'une chaîne d'acquisition, le traitement des données étant parfois réalisé ultérieurement par l'homme. Comme présenté dans les chapitres précédents mes activités de recherche sur les laboratoires distants (d'enseignement ou d'ingénierie côtière) concernent différents domaines d'application. Nous utilisons énormément le logiciel LabVIEW qui a l'avantage de présenter une certaine généricité pour superviser des systèmes technologiques. La facilité d'utilisation de ce logiciel nous a permis de valider rapidement des preuves de concept. Cependant ce logiciel est onéreux et nécessite un contrat de maintenance permanent avec National Instruments afin de garantir le bon fonctionnement de l'ensemble de ses fonctionnalités. Ainsi, afin de faciliter la diffusion de nos développements, d'en réduire les coûts et d'assurer sa pérennité, j'ai obtenu le financement d'un ingénieur en 2018 afin de développer un outil logiciel pour servir ces objectifs. Camille Lavayssière a alors été recruté et a proposé de remplacer les logiciels propriétaires par des logiciels libres. Un logiciel libre est un programme dont le code source est accessible et modifiable par tous. Ses principaux avantages incluent la gratuité, la transparence, la sécurité et la possibilité de personnalisation. Il bénéficie aussi des contributions de la communauté, favorisant son évolution. Cependant, il peut présenter des inconvénients tels qu'une complexité d'utilisation, un support limité, une compatibilité parfois restreinte et l'absence de garanties officielles.

Dans les sections suivantes, les lignes directrices d'un système de supervision sont présentées. Ce logiciel et son instrumentation associée doivent permettre de :

- communiquer avec des instruments,
- lire, enregistrer, traiter et visualiser un grand nombre de données,
- envoyer des consignes, définir des événements et automatiser des tâches,
- construire des interfaces correspondant aux besoins de différents utilisateurs avec une gestion de droits d'accès,
- mobiliser peu de ressources matérielles pour réduire les coûts et favoriser le déploiement.

6.2 Supervision logicielle et instrumentation

6.2.1 Systèmes physiques, télémessure, télécontrôle et automatisation

Un système physique instrumenté et supervisé peut être décrit par la figure 6.1. La télémessure, considérée comme les "yeux" du système, permet de mesurer des grandeurs physiques et d'envoyer ces informations vers un système de supervision. Elle repose sur l'utilisation de capteurs dont les sorties électriques sont numérisées pour être transmises via des protocoles de communication adaptés. Ces données sont ensuite archivées pour être exploitées.

Le télécontrôle constitue les "mains" du système, permettant d'agir à distance sur divers composants tels que des systèmes numériques ou des pré-actionneurs. Cette interaction facilite l'automatisation, où des algorithmes prennent des décisions basées sur des conditions préétablies.

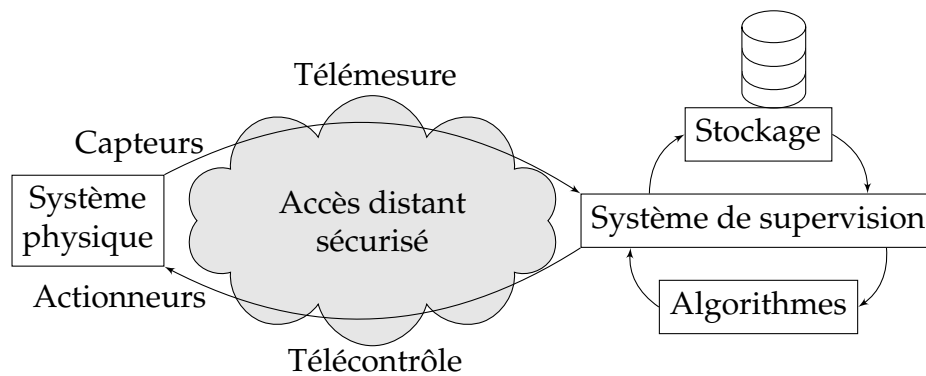


FIGURE 6.1 – Supervision et instrumentation d'un système physique.

Finalement, pour compléter l'analogie anthropologique, le système de supervision est le "cerveau" et le stockage constitue la "mémoire" d'un système supervisé.

6.2.2 Stockage des données et interopérabilité

Les données de télémessure et de télécontrôle sont stockées dans des bases de données sécurisées, facilitant leur accès. L'interopérabilité des systèmes est assurée par l'utilisation de standards ouverts (CSV (Comma-Separated Values), HDF5 (Hierarchical Data Format version 5), [Modbus](#), etc.), garantissant une compatibilité avec divers outils d'analyse et de visualisation.

6.2.3 Accès distant et défis sécuritaires

L'accès distant est un atout majeur, permettant aux opérateurs d'interagir avec un système sans se déplacer. Toutefois, il impose des défis de sécurité, nécessitant des mécanismes de chiffrement et des protocoles de communication sécurisés. Des stratégies de protection doivent être mises en place pour prévenir les intrusions et assurer l'intégrité des données.

6.2.4 Données et logiciels FAIR

Depuis 2009, le nombre d'objets connectés a dépassé celui des êtres humains [1], marquant l'entrée dans l'ère de l'Internet des Objets (IoT). Cette évolution génère une quantité massive de données, parfois accessibles librement sur des plateformes dédiées [2], telles que Météo France¹, OpenWeatherMap² ou les portails gouvernementaux.

Face aux défis liés à la dispersion et à l'hétérogénéité des données, les principes FAIR (*Findable, Accessible, Interoperable, Reusable*) ont été définis par [3] pour améliorer leur accessibilité et leur exploitation. Ces principes visent également à minimiser l'impact environnemental des données [4].

Initialement appliqués aux données (voir tableau 6.1), ces principes ont été étendus aux logiciels de recherche [5] (voir tableau 6.2). Chaque version logicielle doit être identifiable et conforme aux standards FAIR, incluant l'accessibilité des dépendances et une documentation standardisée.

La notion de toile sémantique (en anglais *semantic web*) est apparue en 2001 dans l'article [6] qui présente une nouvelle orientation d'internet. Le web a d'abord été créé pour être

1. <https://donneespubliques.meteofrance.fr/>

2. <https://openweathermap.org/>

TABLE 6.1 – Principes des données FAIR [3].

Qualificatif	Sigle	Définition
Trouvable	F1-F4	Identifiant unique, méta-données riches, indexation.
Accessible	A1-A2	Protocole standard, méta-données accessibles même sans les données.
Interopérable	I1-I3	Langage formel, vocabulaires standardisés, références croisées.
Réutilisable	R1-R1.3	Description riche, licence claire, provenance documentée.

TABLE 6.2 – Principes des logiciels FAIR [5].

Qualificatif	Sigle	Définition
Trouvable	F1-F4	Identifiant global, registre de logiciels.
Accessible	A1-A2	Protocole ouvert, accès aux méta-données même sans le logiciel.
Interopérable	I1-I4S	Langage formel, vocabulaires FAIR, documentation des dépendances.
Réutilisable	R1-R1.3	Licences claires, provenance détaillée, conformité aux standards.

utilisé, lu et conçu par et pour les humains. Il était orienté autour de documents écrits par exemple en langage [HTML](#).

Avec le web sémantique, aussi appelé web 3.0, internet sera orienté autour de données, de méta-données et d'informations qui pourront être traitées automatiquement par des algorithmes. Le web sémantique rejoint les recommandations [FAIR](#), c'est-à-dire que chaque ressource doit être identifiable par un identifiant uniforme de ressource (en anglais URI pour *Uniform Resource Identifier*) et accessible par une adresse web (en anglais URL pour *Uniform Resource Locator*, qui est un sous-groupe des URI).

Dans ce contexte, l'utilisation d'ontologies et de graphes de connaissances permet de structurer et de relier les données selon des relations sémantiques normalisées, facilitant ainsi l'interopérabilité et la réutilisation des informations conformément aux principes [FAIR](#) [6].

6.2.5 Catégories de logiciels

La Free Software Foundation (FSF)³, fondée par Richard Stallman, promeut la liberté des utilisateurs d'ordinateurs et distingue plusieurs catégories de logiciels, définies par Chao-Kuei de la fondation GNU⁴). Ces catégories incluent les logiciels libres, les logiciels privés et les logiciels à téléchargement gratuit, qui peuvent appartenir à l'une des deux premières catégories.

Les logiciels libres, selon la définition de la fondation GNU⁵, accordent quatre libertés essentielles : exécuter, étudier, modifier et partager le logiciel. À l'inverse, les logiciels *open*

3. <https://www.fsf.org/>

4. <https://www.gnu.org/philosophy/categories.fr.html>

5. <https://www.gnu.org/philosophy/free-sw.fr.html>

source se focalisent sur l’accessibilité du code source sans nécessairement garantir ces libertés [7].

Le *copyleft*⁶, tel que la licence GNU GPL⁷, garantit que toute modification d’un logiciel libre conserve la même licence, empêchant ainsi son appropriation sous une licence propriétaire.

Dans un contexte scientifique, les auteurs de [8] formulent quatre recommandations pour les logiciels de recherche : rendre le code source public dès sa création, faciliter son accès via des dépôts et des identifiants pérennes, choisir une licence adaptée et définir des règles de collaboration. Ces recommandations s’inscrivent dans les principes FAIR, favorisant la transparence et la réutilisation des logiciels.

6.2.6 Interopérabilité

Depuis 2005, le gouvernement français publie un référentiel général d’interopérabilité⁸, structuré en plusieurs niveaux [9] : juridique (cadre légal des échanges de données), organisationnel (responsabilités et événements déclencheurs), technique (transport des données), syntaxique (formats de transmission) et sémantique (signification des données).

Dans le cadre d’un système de supervision, ces niveaux se traduisent par la licence logicielle (juridique), un processus de supervision (organisationnel, voir section 6.2.7), la télémesure et le télécontrôle (technique), les protocoles de communication (syntaxique) et la présentation des données (sémantique), en leur apportant de la valeur [10].

L’interopérabilité est essentielle à toutes les étapes de mise en place d’un système, de l’installation logicielle à l’interaction avec le matériel à distance. Elle repose sur le partage de protocoles et de formats communs, permettant une intégration cohérente dans un ensemble plus large.

Des organismes tels que le World Wide Web Consortium (W3C)⁹ définissent des standards ouverts favorisant cette interopérabilité. Toutefois, certains monopoles peuvent la restreindre pour renforcer leur position, comme l’illustre la décision de la Commission européenne contre Microsoft [11].

6.2.7 FAIR et Supervision

Un **processus de supervision** peut être schématisé par la figure 6.2. Il implique :

- des variables d’entrée définies ou non par l’utilisateur (ex. date, capteurs),
- des algorithmes traitant ces données,
- des variables de sortie pouvant être stockées ou contrôler des actionneurs.

Pour garantir la conformité aux principes FAIR, un processus de supervision doit :

- être identifiable via un PID (trouver),
- être ajoutable à une instance (réutiliser),
- être modifiable et interopérable (capteurs et actionneurs),
- être publié sur une plateforme publique ou privée (accessible).

Les variables et données générées doivent également respecter ces principes en étant :

- associées à un PID,
- documentées pour assurer leur réutilisation et interopérabilité,
- disponibles sur une plateforme accessible.

6. <https://www.gnu.org/licenses/copyleft.html>

7. <https://www.gnu.org/licenses/gpl.html>

8. <https://www.numerique.gouv.fr/publications/interopabilite/>

9. <https://www.w3.org/>

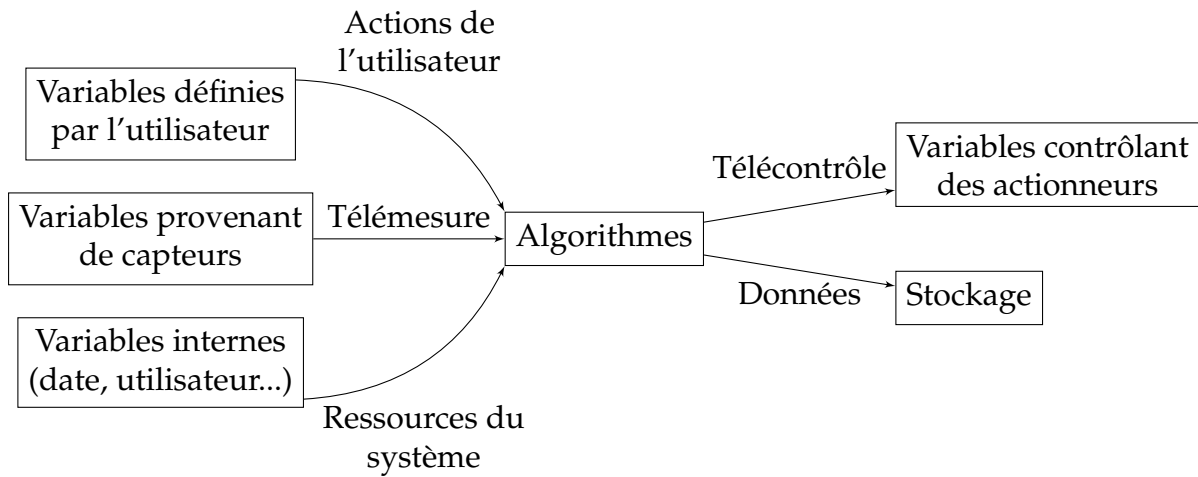


FIGURE 6.2 – Schéma d'un processus de supervision.

6.2.8 Différentes interopérabilités

L'interopérabilité d'un système peut être caractérisée par sa complexité d'intégration [12]. Elle varie de la connexion **simple** (Plug-and-Play) à l'intégration **complexe** nécessitant des interfaces spécialisées, en passant par l'intégration **moyenne** nécessitant une configuration. L'interopérabilité sémantique garantit que les informations échangées conservent leur sens, évitant ainsi des erreurs potentiellement critiques [13].

L'interopérabilité doit prendre en compte les éléments suivants :

- Matériel hôte et système d'exploitation (OS) : un logiciel de supervision doit fonctionner sur divers OS, soit par un langage compatible, soit via des conteneurs pour assurer une large interopérabilité matérielle.
- Communication avec d'autres matériels : les logiciels de supervision doivent supporter plusieurs protocoles de communication¹⁰ afin d'assurer une interaction efficace avec divers équipements et permettre une évolutivité.
- Utilisation de bibliothèques : les licences logicielles influencent l'intégration de bibliothèques. L'utilisation de licences compatibles (GPL v3, AGPL v3¹¹) garantit l'évolutivité et l'accessibilité du logiciel [8].
- Différents profils d'utilisateurs : l'interopérabilité d'une interface homme-machine concerne plusieurs profils :
 - **Configurer** : adaptation aux besoins métier et sémantiques des utilisateurs.
 - **Utiliser** : compatibilité avec divers supports (ordinateurs, tablettes, mobiles).
 - **Visualiser** : intégration de multiples représentations graphiques adaptées aux domaines spécifiques.
 - **Développer** : modularité via une architecture *plugin* garantissant flexibilité et évolutivité.

6.2.9 Choix d'un système de supervision

L'analyse des systèmes de supervision et d'instrumentation à distance dans divers domaines d'application a été présentée dans la thèse de Camille Lavayssière [14], que j'ai co-encadrée avec Franck Luthon, où huit critères de classification ont été identifiés :

1. Logiciels libres et ouverts.

10. https://en.wikipedia.org/wiki/List_of_automation_protocols

11. <https://www.gnu.org/licenses/agpl.html>

2. Intégration de diverses architectures matérielles et protocoles.
3. Accès sans installation de logiciel ou *plugin*.
4. Configuration sans nécessité de coder.
5. Système de gestion de contenu (SGC) pour personnaliser l'IHM.
6. Évolution du système facilitée par un *framework*.
7. Ajout de scripts, événements et alertes.
8. Gestion multi-sites.

Le tableau 6.3 compare les solutions existantes selon ces critères. Les logiciels industriels et LabVIEW de National Instruments se démarquent, mais peu de solutions intègrent un SGC ou un *framework* facilitant l'évolution du logiciel.

Les besoins clés pour un système générique sont :

- Interaction avec capteurs et actionneurs.
- Conservation, traitement et présentation des données.
- Attribution de sens aux données via algorithmes et automatisation.
- Abstraction de la distance entre utilisateur et système.
- Indépendance vis-à-vis du domaine scientifique.
- Simplicité et intuitivité pour tous les profils d'utilisateurs.
- Facilité de copie, modification et installation du système.
- Liberté d'utilisation, de modification et de distribution.

TABLE 6.3 – Comparaison de différentes solutions avec les 8 critères de classification (O = Oui ; N = Non ; ? = Inconnu).

Secteur	Solution	Critères								Score
		1	2	3	4	5	6	7	8	
Industrie	Tango Controls	O	O	N	O	N	N	O	O	5
	Scada-LTS	O	O	O	O	O	N	O	O	7
	RapidSCADA	N	O	O	O	N	N	N	O	4
Recherche	National Instruments	N	O	N	N	O	O	O	O	5
	PyMoDAQ	O	N	N	O	N	N	O	N	3
	PyMeasure	O	N	N	N	N	N	O	N	2
	NSLS-II	O	N	N	N	N	N	O	N	2
	Yaq	O	N	N	N	N	N	O	N	2
Enseignement	LabsLand	N	N	O	O	N	N	N	O	3
	VISIR	N	N	O	O	N	O	N	O	4
	ISES	N	N	O	?	N	N	N	O	2
	UniLabs	O	N	N	O	N	N	N	O	3
	RexLab	O	N	O	O	N	N	N	O	4
	VirtualRemoteLab	N	N	O	?	N	N	N	O	2
	GOLDi	N	N	O	?	N	N	N	O	2
	FEUP	N	N	N	O	N	N	N	O	2
	e-lab IST	N	N	N	?	N	N	N	O	1
	iLABS	N	N	N	?	N	N	N	O	1
	iLAB & LabShare	N	N	N	?	N	N	N	O	1
	FarLabs	N	N	O	?	N	N	N	O	2

6.3 Logiciel PyScada

6.3.1 Présentation

Afin de répondre aux besoins identifiés dans la section précédente et de présenter une application capable de gérer les différents niveaux d'interopérabilité, cette section présente le logiciel **PyScada**, développé initialement par Martin Schröder de l'Université Technique de Berlin. **PyScada** se définit comme :

*Un système **SCADA** open source avec une IHM **HTML5**, construit à l'aide du framework **Django**.*

PyScada se présente sous la forme d'une page web utilisant les standards du web, accessible sur tous les dispositifs récents. Le code source est disponible sur *GitHub*¹² et la documentation sur *ReadTheDocs*¹³.

6.3.2 Abstractions

Les caractéristiques architecturales proposées par [15] sont transposées ici à la supervision. Elles se décomposent en différents niveaux d'abstraction et sont destinées à faciliter la mise en œuvre d'un tel système, l'ajout de nouvelles fonctionnalités (évolutions et modifications) et la configuration d'une installation.

- **Abstraction de la connexion** : permet à l'utilisateur de connecter différents instruments via l'interface web sans modifier le code. L'abstraction peut être forte (interopérabilité PnP), moyenne (configuration guidée) ou faible (lecture manuelle des données JSON).
- **Abstraction de l'expérimentation** : sépare la logique d'une instrumentation des instruments utilisés. L'interface utilisateur peut être créée avant la configuration des instruments et des variables.
- **Abstraction du transport** : change le protocole de communication d'un instrument sans influencer l'expérimentation.
- **Abstraction de la charge utile** : permet d'envoyer des requêtes simples ou complexes indépendamment du protocole. Par exemple, un compteur électrique stockant une valeur sur deux mots de 16 bits requiert une couche d'abstraction pour présenter une donnée unique.
- **Abstraction de la synchronisation** : permet d'utiliser des fonctions synchrones et asynchrones de manière interchangeable.
- **Abstraction des erreurs** : gère les erreurs et pertes de connexion sans impact fonctionnel, avec possibilité d'informer l'utilisateur et d'analyser l'incident.

6.3.3 Présentation de PyScada

PyScada est un logiciel libre et *open source* sous licence AGPL-3.0, disponible sur toute plateforme *UNIX* et *Windows* via *Docker*. Son code source et ses métadonnées sont accessibles sur *GitHub*, et il est également distribué via le *Python Package Index* (PyPI). Un canal de discussion sur *Matrix* permet de gérer les questions et les problèmes rencontrés. **PyScada** suit ainsi les recommandations de [8].

L'architecture de **PyScada** repose sur le *framework* Python **Django** (voir figure 6.3), assurant une facilité de déploiement. Il propose deux interfaces web pour configurer et interagir

12. <https://github.com/pyscada/PyScada>

13. <http://pyscada.rtd.io>

avec des instruments utilisant divers protocoles : [Modbus](#), [BACnet](#), [VISA](#), [OneWire](#), [I2C-SMBus](#), [GPIO](#), [OPC-UA](#), [SML](#), [Serial](#) et [webservice](#). Grâce à son architecture modulaire, de nouveaux protocoles peuvent être intégrés aisément, améliorant l'interopérabilité. La géné-

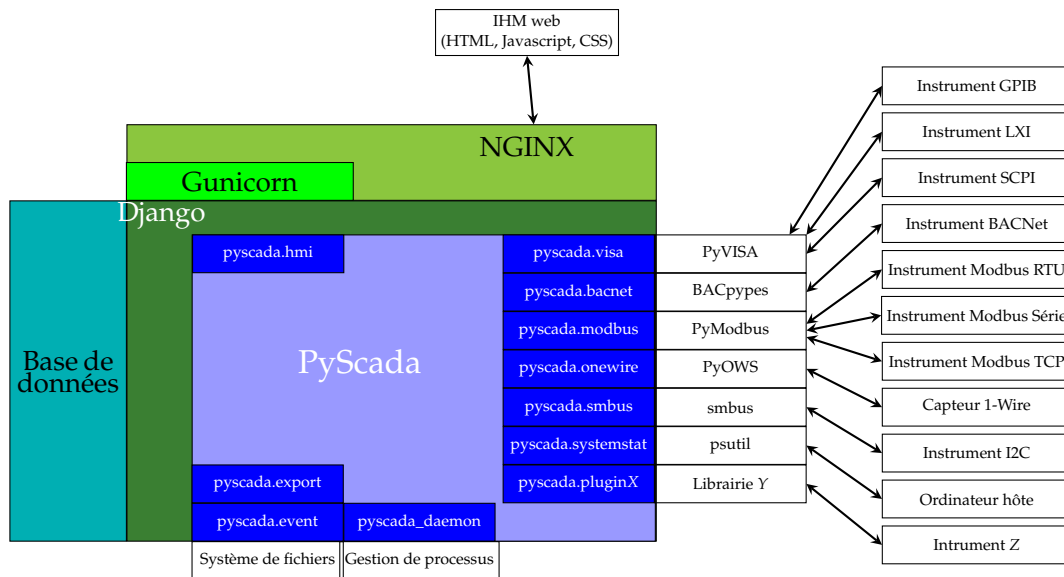


FIGURE 6.3 – Schéma de la structure de PyScada dans l'environnement [Django](#).

ration des pages web repose sur le serveur NGINX et la passerelle Python WSGI Gunicorn.

Les matériels et variables sont configurés par une couche abstraite et une couche spécifique au protocole utilisé (voir section 6.3.6). [PyScada](#) assure ainsi une gestion uniforme des variables en lecture et écriture. Ces données permettent de créer des événements, des alertes et d'exécuter des scripts automatisant des processus complexes.

6.3.4 Django

[Django](#) est un *framework web* Python, favorisant un développement rapide et structuré. Il est *open source*, sécurisé, évolutif et bénéficie d'une large communauté ainsi que de mises à jour régulières.

L'architecture de [Django](#) repose sur un modèle de type [MVT Model-View-Template](#) (figure 6.4), qui sépare le **modèle** pour structurer et manipuler les données, la **vue** qui traite les demandes des utilisateurs et les **templates** (ou gabarits) qui sont utilisés pour générer des pages web [HTML](#) de manière dynamique.

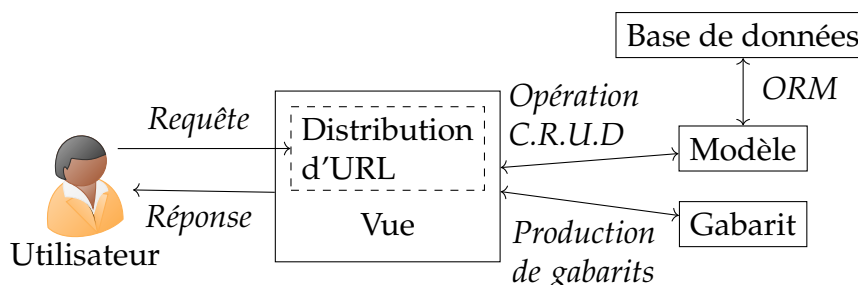


FIGURE 6.4 – Architecture [Django MVT](#).

L'approche [MVT](#) apporte plusieurs avantages :

- Facilite l'évolution du site grâce à la modularité,
- Permet d'afficher un même modèle sous différentes vues,

- Sépare la logique de l'application, l'affichage et la gestion des données,
- Améliore la maintenance et la collaboration entre développeurs.

Cette architecture permet à **PyScada** de gérer la supervision et l'instrumentation d'applications diverses, notamment grâce à l'abstraction des expérimentations supervisées.

6.3.5 Cœur de PyScada

Les modules de **PyScada** communiquent de manière asynchrone via une base de données, comme illustré par la figure 6.5.

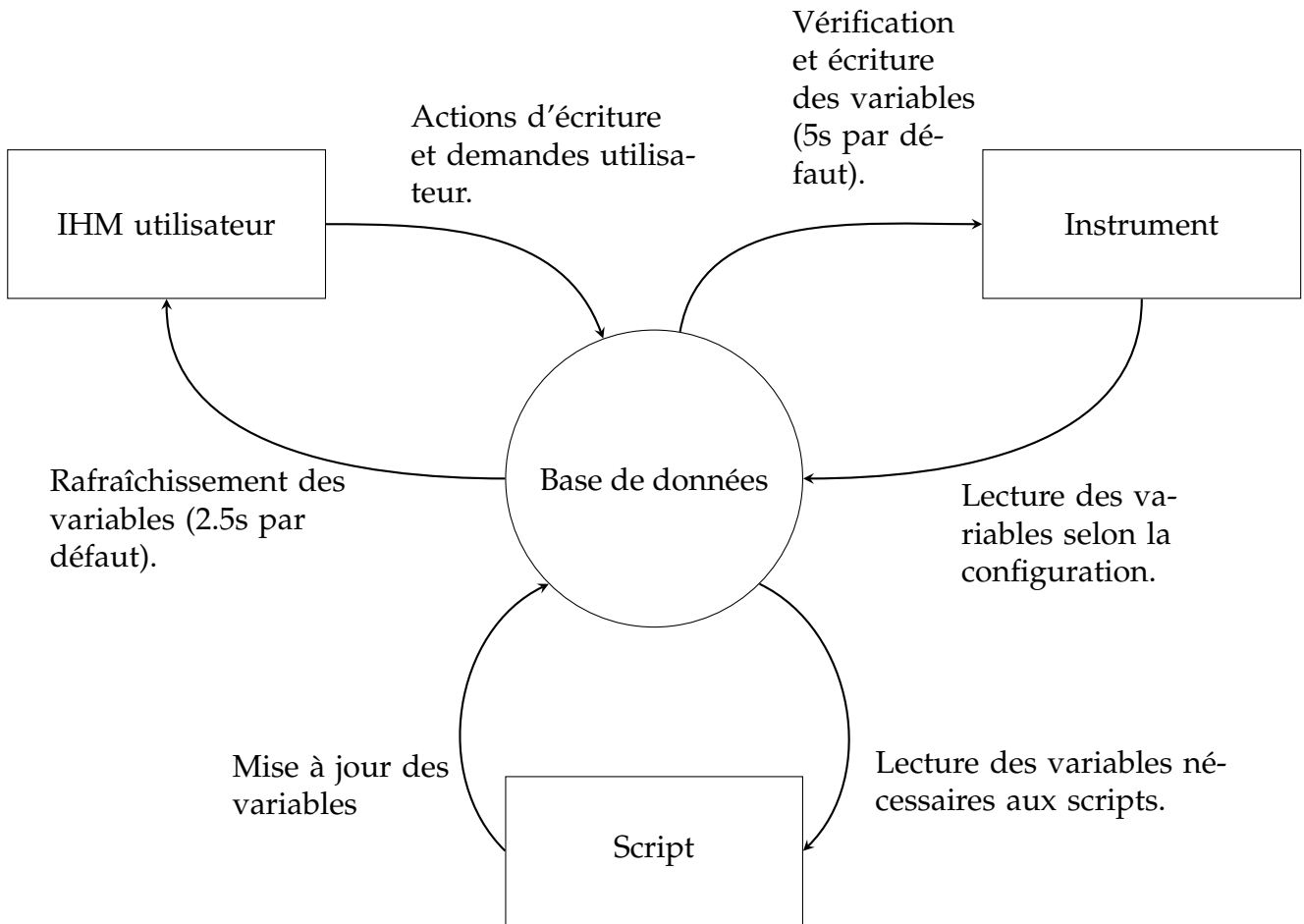


FIGURE 6.5 – Communication asynchrone des modules de PyScada via la base de données.

Les instruments possèdent des caractéristiques communes :

- un nom,
- un protocole de communication,
- un intervalle de rafraîchissement.

Chaque variable est attachée à un instrument et peut être en lecture (télémessure) ou écriture (télé-contrôle). Par défaut, les valeurs sont mises à jour périodiquement, sauf en cas de demande explicite de lecture anticipée (*Device Read Task*). Pour les variables à écriture, l'instrument vérifie toutes les cinq secondes si une **action d'écriture** (*Device Write Task*) est requise.

L'IHM utilisateur rafraîchit, avec un intervalle de temps réglable, les variables affichées. Elle permet également d'envoyer des **actions d'écriture** via diverses interactions (boutons, champs, listes déroulantes, etc.).

PyScada permet l'exécution de scripts Python, qui peuvent interagir avec les variables et gérer des actions. Certains *plugins* (alertes, exportation de données) fonctionnent de manière similaire, en interrogeant la base à intervalles réguliers.

Une option, à sélectionner lors de l'installation, permet d'améliorer la réactivité du système en notifiant instantanément un instrument ou un script lors d'une **demande de lecture** ou **d'écriture**, en s'appuyant sur Redis et *Django Channels*.

6.3.6 Couche d'abstraction matérielle

La couche d'abstraction matérielle (HAL, de l'anglais *Hardware Abstraction Layer*) est un intermédiaire entre le matériel et le logiciel, offrant une interface standardisée pour faciliter l'interopérabilité et la programmation. Elle est couramment utilisée dans les systèmes d'exploitation pour interagir avec le matériel de manière uniforme [16], mais également dans des domaines tels que la robotique et les réseaux informatiques [17].

Dans le cadre de l'instrumentation à distance, cette approche vise à accroître la prise en charge des protocoles et des instruments, à simplifier le code de télémessure et de télécontrôle, et à standardiser les données accessibles à l'utilisateur. Nous avons adapté l'architecture modulaire de [17] à *PyScada* (figure 6.6), permettant ainsi l'ajout de nouvelles fonctionnalités sans modifier l'ensemble du système.

L'architecture HAL sépare la complexité propre à chaque protocole de la logique d'exécution du logiciel, offrant une interface unique aux utilisateurs. Elle se compose de deux sous-couches : la **couche de la plateforme multi-matérielle** (CHPL, *Cross-Hardware Platform Layer*) et la **couche spécifique au matériel** (HSL, *Hardware Specific Layer*).

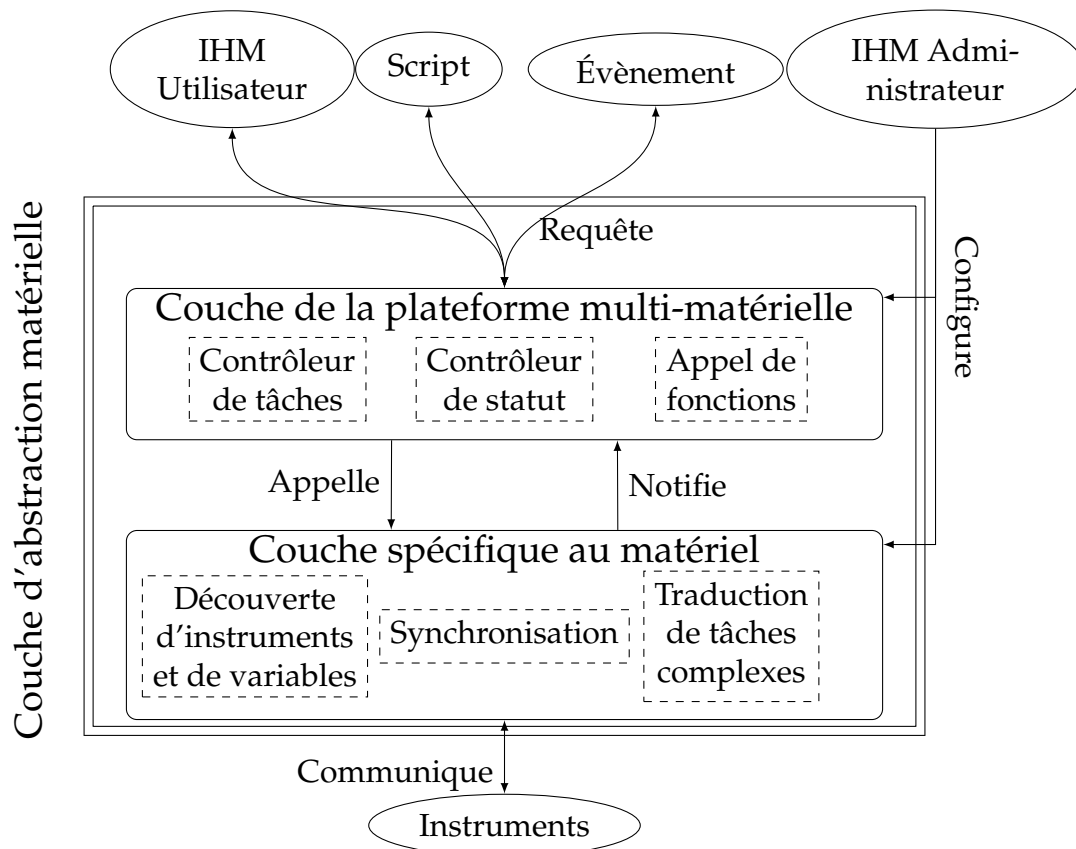


FIGURE 6.6 – Architecture HAL de PyScada.

6.3.7 Interfaces web

L'architecture [Django](#) propose deux interfaces web pour l'accès distant. L'**interface utilisateur** permet d'accéder aux expérimentations en consultant les données associées et en envoyant des consignes si nécessaire. L'**interface d'administration**, quant à elle, sert à configurer le système de supervision : elle permet de paramétrer les instruments, définir les variables et créer l'interface utilisateur grâce à un système de gestion de contenu (CMS, *Content Management System*).

Interface d'administration

[Django](#) fournit une interface d'administration afin d'exécuter les opérations C.R.U.D. (Créer, Lire, Mettre à jour, Supprimer) sur les modèles de l'application.

La figure 6.7 illustre la structure "en blocs" de cette interface. Certains, comme le bloc *Authentication* (gestion des utilisateurs et groupes), sont intégrés par défaut à [Django](#), tandis que d'autres, tels que *Core* et *IHM*, sont ajoutés par [PyScada](#). Des blocs supplémentaires peuvent apparaître avec l'installation de *plugins*, chacun définissant des modèles et leurs champs spécifiques.

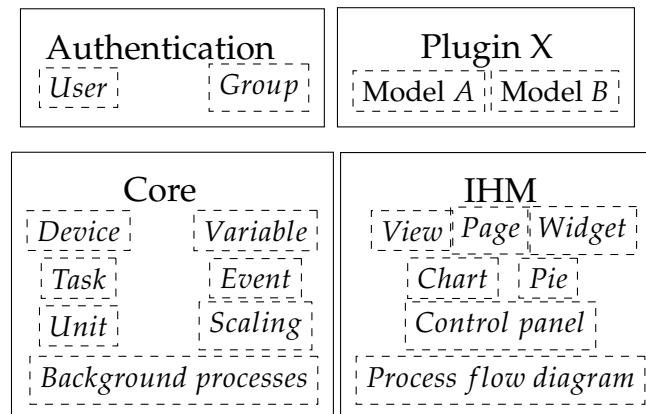


FIGURE 6.7 – Architecture de l'interface d'administration incluant certains des principaux blocs de [PyScada](#) et une liste non exhaustive de leur modèle.

L'application *Authentication* de [Django](#) permet de gérer les utilisateurs et groupes, en attribuant des droits d'accès répondant ainsi aux besoins des utilisateurs souhaitant configurer, exploiter et surveiller le système de supervision.

IHM utilisateur

L'interface utilisateur permet une interaction à distance avec l'expérimentation en s'appuyant sur des éléments dynamiques. La figure 6.8 illustre sa structure, comprenant :

- des vues intégrant plusieurs pages ;
- des pages contenant divers *widgets* ;
- des *widgets*, blocs organisant les composants graphiques dans les pages ;
- des éléments statiques (texte, image) et dynamiques (graphique, indicateur, bouton, entrée).

Les *widgets* se positionnent selon une grille de 12 lignes et 4 colonnes.

Les variables de télémessure s'affichent sous forme de valeurs instantanées, séries temporelles, graphiques XY, camemberts ou jauges. Diverses options améliorent l'ergonomie, comme le codage couleur ou la conversion des *timestamps* en dates lisibles. Le télécontrôle repose sur des boutons (booléens), champs de saisie (nombres) et listes déroulantes (textes).

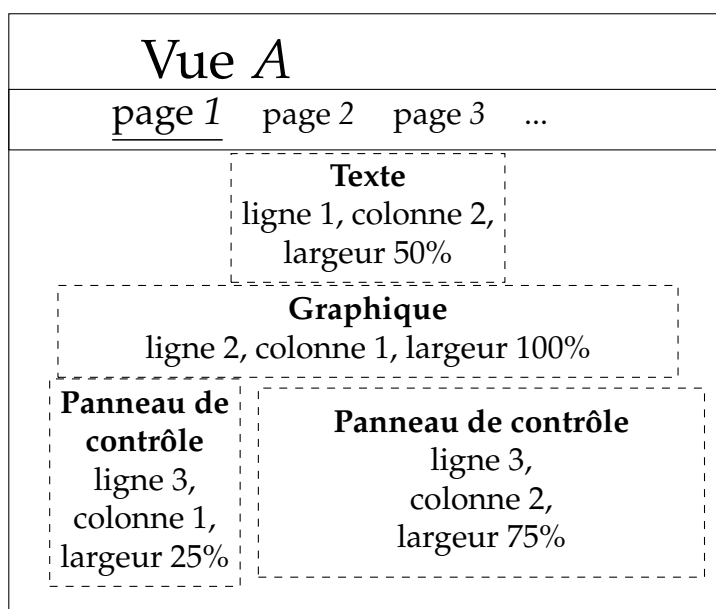


FIGURE 6.8 – Schéma d’une **vue A** contenant trois pages. La **page 1** est sélectionnée et affiche quatre *widgets*. Le *widget* de la première ligne contient du **texte** et est situé en colonnes deux et trois, il occupe la moitié de la largeur de la page. Le *widget* de la deuxième ligne contient un **graphique** et occupe 100% de la largeur de la page. Les *widgets* de la troisième ligne contiennent chacun un **panneau de contrôle** permettant d’afficher des valeurs ou d’envoyer des consignes, ils occupent respectivement une et trois colonnes de large.

La figure 6.9 présente une interface avec plusieurs types de composants graphiques, structurée en lignes et colonnes. Une barre de navigation facilite l’accès aux différentes pages et fonctionnalités, comme le rafraîchissement automatique des données.

PyScada permet de créer plusieurs interfaces adaptées aux profils des utilisateurs. L’affichage peut être personnalisé selon les droits d’accès, évitant ainsi la duplication des interfaces. Par exemple, un utilisateur **A** peut voir un bouton absent pour un utilisateur **B**, simplement en configurant les permissions.

6.3.8 Synthèse

Les contributions apportées au cours la thèse de Camille Lavayssière [14] pour répondre aux besoins identifiés reposent sur :

- des abstractions facilitant l’interopérabilité logicielle et une organisation modulaire,
- une architecture permettant :
 - d’afficher une expérimentation distante via une interface web accessible,
 - d’interagir avec capteurs et actionneurs pour analyser divers systèmes physiques,
 - de traiter et interpréter les données grâce à des algorithmes ou une gestion événementielle,
 - d’adapter l’interface aux différents profils d’utilisateurs,
 - d’évoluer face à de nouveaux enjeux avec une approche agnostique,
- une licence ouverte permettant l’utilisation, modification et distribution du logiciel.

Le tableau 6.4 illustre l’évolution de *PyScada* selon les huit critères de classification des logiciels de supervision.

Des axes d’amélioration subsistent, notamment : la mise en place de **PID** pour toute donnée, processus ou algorithme, l’intégration de la version du logiciel dans les méta-données, la création d’un **vocabulaire** standardisé pour l’utilisation et le développement du logiciel,

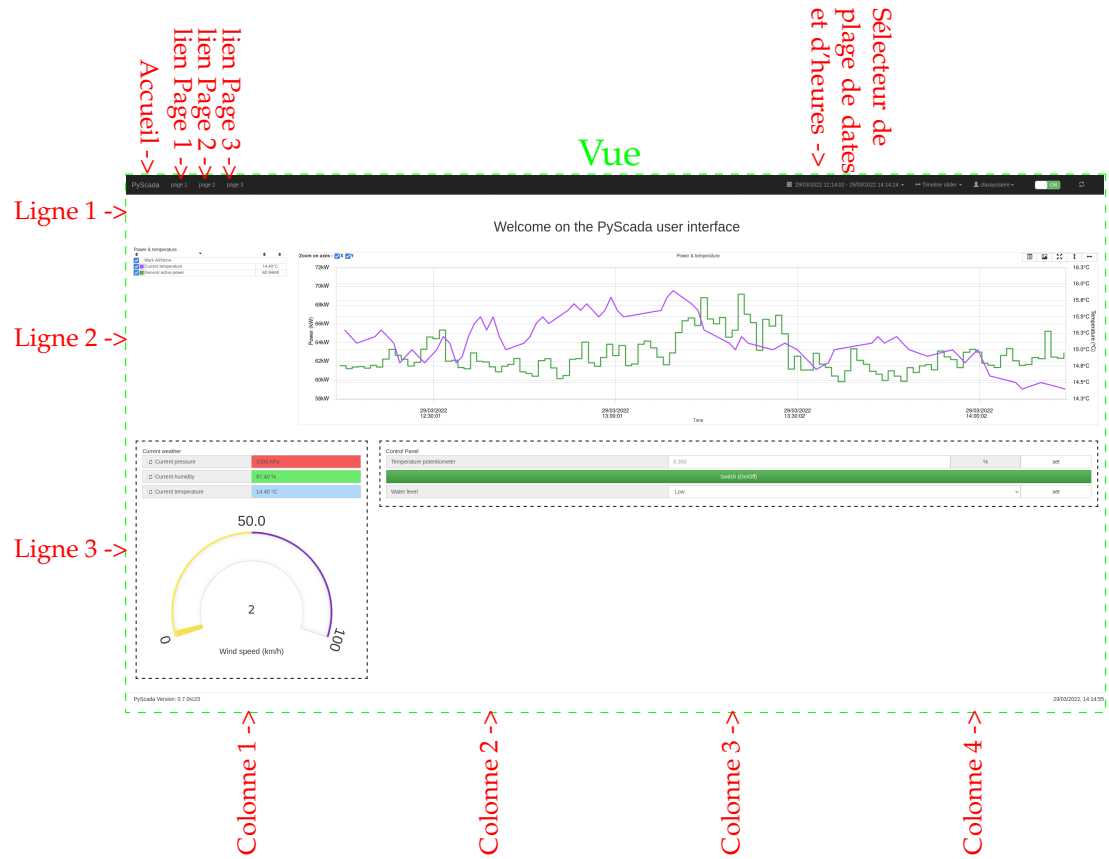


FIGURE 6.9 – Exemple d’interface utilisateur de PyScada.

TABLE 6.4 – Comparaison de PyScada avec les 8 critères de classification (O = Oui; N = Non).

Solution	Critères								Score
	1	2	3	4	5	6	7	8	
PyScada avant 2019	O	N	O	O	O	O	N	N	5
PyScada après 2022	O	O	O	O	O	O	O	O	8

ainsi que la possibilité de décentralisation via une fédération de solutions de supervision et d’instrumentation.

6.4 Exemples d’application

Le logiciel [PyScada](#) a été déployé sur plusieurs systèmes mutli-physiques au sein des laboratoires de l’université mais également dans des bâtiments afin de suivre les consommations énergétiques.

Dans un premier temps, je présenterai le déploiement pour le télé-contrôle de l’application Laborem vue en section 3. Ensuite, je décrirai l’implémentation du logiciel lors des travaux de recherche relatifs à la supervision d’ouvrages du littoral sur la digue de l’Artha (voir section 5), sur les falaises de Bonifacio et sur différents sites d’exploration vidéos situés sur le littoral basque. Enfin, j’exposerai la mise en place de [PyScada](#) au sein de bâtiments pour superviser leurs consommations énergétiques.

6.4.1 Laborem

L'interface **PyScada** de Laborem permet aux étudiants d'accéder à des séquences de travaux pratiques par l'intermédiaire d'un navigateur web. Lors de cet apprentissage à distance, des questions leur sont posées pendant les expériences et leurs résultats sont intégrés à un classement *TOP10*, inspiré du *hall of fame* des jeux vidéo [18].

Pour gérer les connexions simultanées, une file d'attente a été implémentée. Laborem différencie plusieurs groupes d'utilisateurs aux droits distincts :

- **Expérimentateur** : un seul étudiant manipule l'expérience et doit céder sa place après un temps imparti si d'autres attendent.
- **Observateurs** : ils assistent à l'expérience en temps réel sans pouvoir interagir directement.
- **Étudiants en attente** : ils visualisent uniquement leur temps d'attente, leur rang et le *TOP10*.
- **Enseignants** : ils disposent d'une interface avancée leur permettant de superviser et d'ajuster certains paramètres (ex. gestion du temps d'expérimentation, modification du nombre d'observateurs, visualisation des résultats et réponses aux questions du *TOP10*).

La figure 6.10 illustre la page d'accueil de l'interface, où les enseignants accèdent à des fonctionnalités supplémentaires.

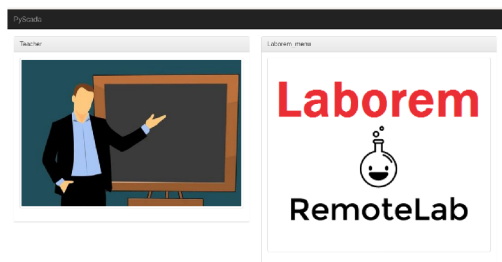


FIGURE 6.10 – Accès aux interfaces enseignant (à gauche) et étudiant (à droite) de Laborem.

L'interface étudiant se compose de trois sections principales :

- **Accueil** : présentation des objectifs, gestion de la file d'attente et du *TOP10*.
- **Sélection du plug** : choix du circuit à analyser.
- **Expériences** : accès aux différentes études possibles, telles que les diagrammes de Bode ou l'analyse fréquentielle.

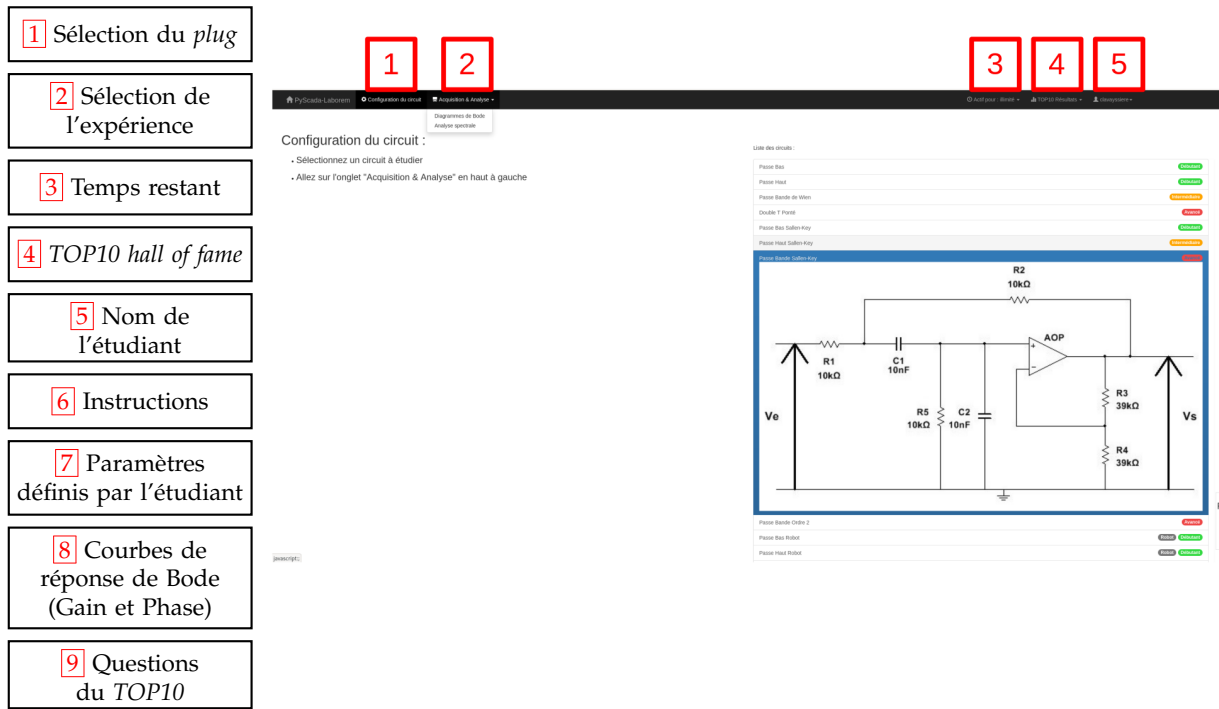
La figure 6.11 illustre l'interface de ces différentes sections.

Les fonctionnalités spécifiques à Laborem ont été intégrées dans **PyScada** via un *plugin*, **PyScada-Laborem**, disponible sur *GitHub Laborem*¹⁴. Celui-ci facilite la duplication et la réutilisation de l'interface et de la configuration.

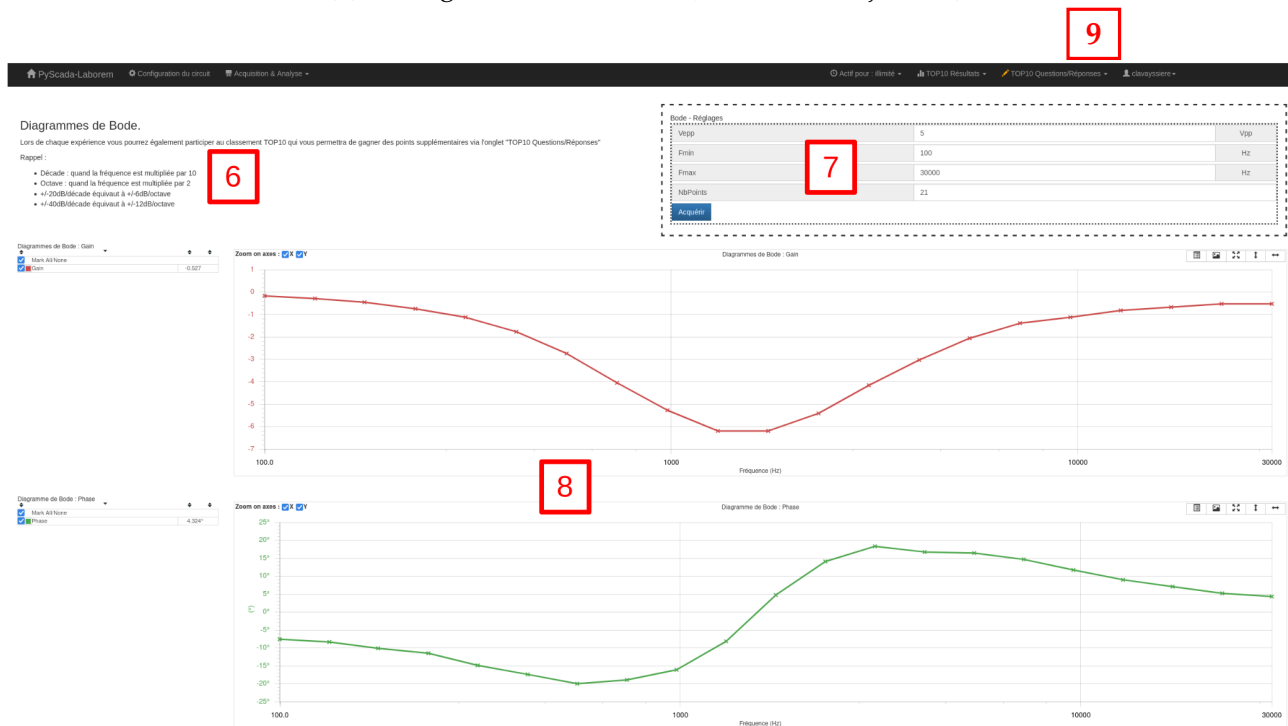
L'interface administrateur de **PyScada** permet d'administrer entièrement Laborem :

- modifier les interfaces étudiant et enseignant (section **IHM** de **PyScada**),
- ajuster les scripts des expériences (section **Scripting**),
- gérer les instruments connectés (section **Core**),
- configurer les circuits étudiés et leurs *plugins* (section **Laborem**),
- éditer les questions et analyser les réponses des étudiants (section **Laborem**).

14. <https://github.com/clavay/PyScada-Laborem>



(a) Configuration du circuit (ici un filtre réjecteur).



(b) Résultats d'un diagramme de Bode.

FIGURE 6.11 – L'interface étudiant simple à utiliser.

6.4.2 Supervision d'ouvrages du littoral

6.4.3 Digue de l'Artha

PyScada est installé sur un SBC (ici un Raspberry Pi) et son interface utilisateur (voir figure 6.12) permet de :

- connaître l'état de la centrale de mesure (acquisition en cours, archivage des données,

- attente de la prochaine acquisition),
- afficher et modifier les paramètres de mesure (fréquence d'acquisition, mode manuel ou automatique d'acquisition, durée de la mesure, temps restant de l'acquisition en cours),
- lancer une acquisition manuelle,
- connaître la valeur des capteurs de pression,
- afficher l'état du routeur (signal, quantité de données transmises),
- afficher l'état du stockage sur le Raspberry Pi et des différentes connexions Ethernet avec le routeur, la centrale de mesure et le réseau virtuel privé (VPN de l'anglais *Virtual Private Network*) de l'université,
- lister les enregistrements en cours de transfert vers les serveurs du laboratoire.

PyScada communique avec la centrale de mesure à l'aide de [webservices](#), avec le routeur via des commandes AT (de l'anglais *Attention*, définies dans la norme ETSI GSM 07.07¹⁵) et avec un relais qui éteint la centrale de mesure afin d'alléger la consommation du système quand des mesures ne sont pas prévues. Différentes alertes sont configurées et envoient un mail si le niveau de la batterie ou si l'espace disque du Raspberry Pi deviennent trop faibles.



FIGURE 6.12 – Interface utilisateur de PyScada sur la station de la digue de l'Artha. En haut, les valeurs instantanées en lecture et/ou écriture. En bas, un graphique représentant l'état des capteurs (ici enregistrement de la pression atmosphérique).

Avec les progiciels classiques basés sur un navigateur, tous les points de données sont transmis directement au navigateur pour être affichés, ce qui permet une interaction spécifique avec chaque courbe ou point, y compris l'affichage des méta-données, les liens vers les sources, etc. Cette approche offre la plus grande flexibilité par point ou par courbe, mais se heurte rapidement aux limites de la quantité de données pouvant être traitées par le navigateur et de la quantité pouvant être affichée à l'écran et résolue par le système visuel humain. L'intégration de la librairie graphique Plotly¹⁶ utilisant Datashader¹⁷ permet de résoudre ce problème et de visualiser une courbe contenant des millions de points sans perte d'information. Datashader est un système de *pipeline* (canalisation) graphique permettant de créer des

15. https://www.etsi.org/deliver/etsi_gts/07/0707/05.00.00_60/gsmts_0707v050000p.pdf

16. <https://plotly.com/>

17. <https://datashader.org>

représentations pertinentes de grands ensembles de données de manière rapide et flexible. Datashader décompose la création d'images en une série d'étapes explicites qui permettent d'effectuer des calculs sur des représentations intermédiaires.

Le résultat d'un enregistrement de dix minutes pour trois capteurs totalisant dix huit millions de points est présenté à la figure 6.13. On y voit les impacts des vagues sur 10 minutes.

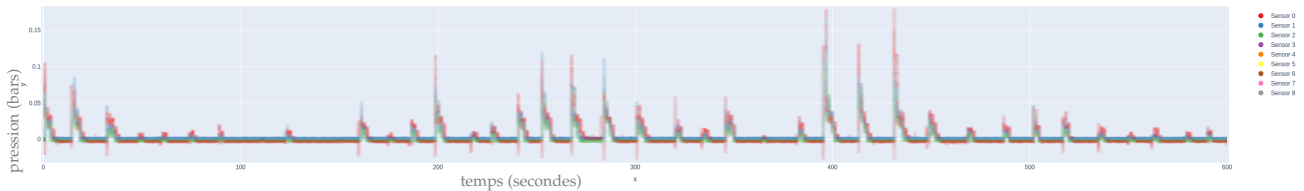


FIGURE 6.13 – Image produite par Plotly et Datashader dans l'IHM web permettant de visualiser 18 millions de points. Il est possible de zoomer sur l'image, Plotly générant une nouvelle image.

6.4.4 Réseau Sirena

Le réseau **Sirena** développé dans le cadre du laboratoire **KOSTARISK** est conçu pour observer et analyser les processus physiques régissant la dynamique littorale dans un environnement côtier anthropisé, soumis à l'action des vagues et influencé par une embouchure.

Ce dispositif se compose d'un réseau de caméras installées sur plusieurs sites stratégiques du littoral basque :

- Le phare de Biarritz (60 m de hauteur),
- La grande plage de Biarritz,
- Anglet,
- Socoa (Ciboure),
- Sainte-Barbe (Saint-Jean-de-Luz).

Ces caméras sont contrôlées à l'aide du logiciel libre **Sirena**, qui permet de collecter différents types d'images et de les transférer via Internet sur les serveurs de l'université.

Ce dispositif de mesure non intrusif permet d'étudier plusieurs phénomènes, notamment :

- les mécanismes de réponse d'une plage à un événement de tempête,
- la réaction des ouvrages de protection face aux tempêtes,
- l'influence des ouvrages de protection sur l'hydrodynamique,
- l'évolution spatio-temporelle d'un panache fluvial,
- le développement de modèles bathymétriques et topographiques,
- la validation et l'amélioration des modèles numériques.

Le logiciel **PyScada** a été implémenté sur une machine virtuelle de l'Université¹⁸ afin de superviser l'état des stations, le bon fonctionnement du logiciel **Sirena** et de fournir une interface de supervision centralisée pour accéder à l'ensemble des stations du réseau. Une image issue de la caméra filmant la digue de l'Artha est disponible en figure 6.14.

Lorsqu'un usager se connecte au site il peut visualiser l'état des stations et accéder à l'ensemble des images générées par le logiciel **Sirena**. Lorsqu'un utilisateur, enregistré ayant les droits nécessaires, souhaite accéder à un diagnostic de l'état de fonctionnement des caméras ou du logiciel **Sirena**, il doit s'authentifier sur le site et l'interface lui offre alors un accès

18. <https://sirena.univ-pau.fr/>



FIGURE 6.14 – Capture d'écran du flux vidéo de la caméra filmant la digue de l'Artha.

complet sur certaines fonctionnalités spécifiques à la gestion du système informatique de chaque station.

6.4.5 Suivi énergétique du bâtiment

Le projet [Laborenergie](#) de mesure et de contrôle de systèmes type Climatisation-Ventilation-Chauffage (CVC) vise à optimiser l'exploitation des bâtiments, assurer un suivi en temps réel de leur performance énergétique et garantir leur conformité aux réglementations actuelles (COP21 ¹⁹, RE2020 ²⁰, décret tertiaire ²¹).

L'intégration des données dans une maquette numérique (*jumeau numérique*, BIM) permet une visualisation intuitive et accessible en temps réel via une plateforme web. Elle met en avant les indicateurs de performance énergétique (tableau de bord, [STD](#), prévisions [IA](#)) et facilite l'optimisation énergétique des bâtiments. L'outil favorise ainsi les économies d'énergie et améliore la gestion du patrimoine bâti en ajustant automatiquement les systèmes de [CVC](#).

Suivi énergétique de l'IUT de Bayonne L'IUT de Bayonne a déployé [PyScada](#) sur son site de Montaury à Anglet. Les étudiants développent une interface de supervision énergétique basée sur des capteurs mesurant la consommation électrique, d'eau et de gaz, ainsi que des données météorologiques. Ce projet illustre l'accessibilité de [PyScada](#) à divers profils utilisateurs et sert de site pilote pour l'université [UPPA](#). Les différents objets connectés dans le bâtiment tels que des compteurs énergétiques ou une station météo sont connectés et archivés sur un serveur de l'IUT via [PyScada](#). Un accès temps réel ou un accès aux archives

19. <https://www.gouvernement.fr/action/la-conference-de-paris-sur-le-climat>

20. <https://www.ecologie.gouv.fr/reglementation-environnementale-re2020>

21. <https://www.legifrance.gouv.fr/jorf/id/JORFTEXT000038812251>

fournissent des données exploitables pour optimiser les consommations énergétiques dans le bâtiment. Déployée sur le bâtiment de l'IUT de Bayonne l'instrumentation permet d'accéder à 200 variables. Une illustration de l'interface est donnée en figure 6.15. On peut y voir des pics de consommation correspondant aux 5 jours ouvrés de la semaine ainsi qu'une consommation talon (en vert) assez significative.

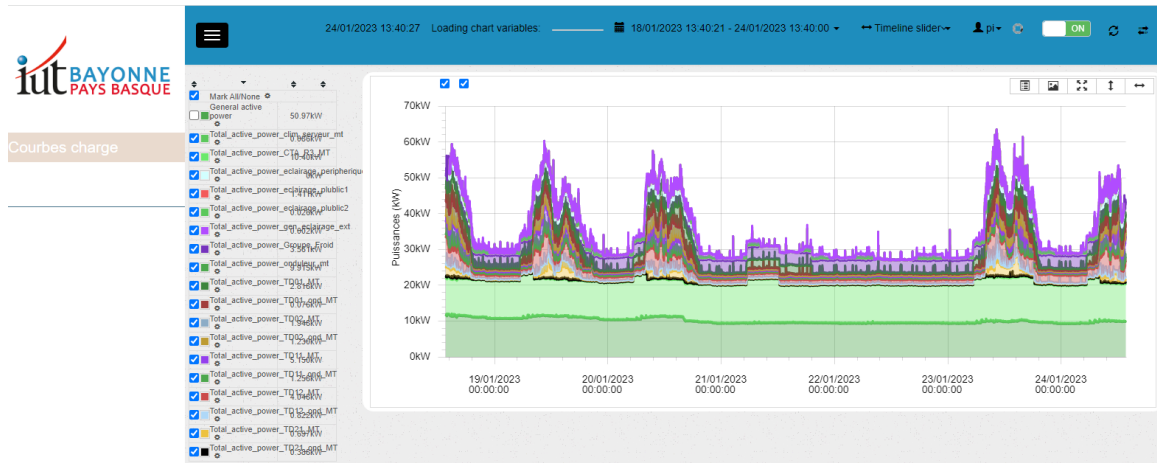


FIGURE 6.15 – Courbes de charge de l'IUT de Bayonne sur une semaine du mercredi au mardi.

Seconde expérimentation : Domolandes Domolandes est un technopôle tourné vers la construction durable et numérique pour les acteurs publics et privés qui s'investissent dans l'écoconstruction, l'habitat et le cadre de vie. L'intérêt d'utiliser [PyScada](#) pour le suivi énergétique des bâtiments est venu d'une collaboration entre le laboratoire [SIAME](#) et les sociétés Hubics et Gallium hébergées sur le technopôle.

Cette collaboration a permis de faire travailler en 2022 trois stagiaires (deux du DUT Informatique et un de la licence professionnelle Écologie Industrielle de l'IUT de Bayonne) sur l'intégration de nouveaux éléments graphiques (librairie et maquette numérique, voir figure 6.16) et sur une solution non intrusive de comptage de consommation électrique.

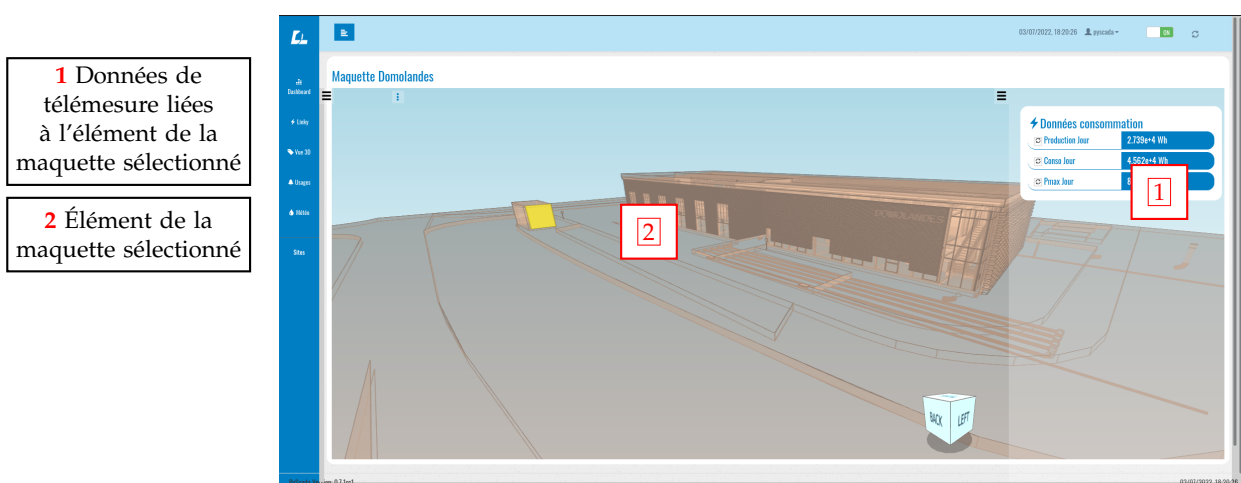


FIGURE 6.16 – Interface de [PyScada](#) montrant l'intégration d'éléments graphiques (panneau de contrôle, graphique, bouton, camembert...) dans une maquette numérique 3D. Chaque élément de la maquette peut être lié à un ou plusieurs éléments graphiques.

Les deux étudiants de deuxième année du DUT Informatique ont développé chacun un

plugin de [PyScada](#). Ceci montre que l'intégration de nouveaux éléments par le développement et l'ajout de *plugin* est accessible à des informaticiens débutants.

6.5 Conclusion

[PyScada](#) est un logiciel structuré autour d'une architecture permettant de présenter l'ensemble d'une expérimentation distante via une interface web accessible depuis tout terminal informatique récent. Son approche abstraite autorise l'échange d'informations avec des capteurs et des actionneurs de systèmes physiques, quel que soit le domaine d'application. Il offre également la possibilité d'implémenter des scripts pour traiter les données, leur conférer du sens et en extraire de la valeur. [PyScada](#) s'adapte à différents profils d'utilisateurs en proposant plusieurs niveaux d'accès technique à l'instrumentation.

À travers les projets présentés dans les chapitres précédents, le développement d'un outil libre et interopérable s'est révélé nécessaire. Il a constitué un fil conducteur dans mes activités de recherche. En effet, la captation de données numériques, le plus souvent issues de systèmes électroniques embarqués, génère une masse d'informations qu'il est indispensable d'exploiter : accès, archivage, analyse et valorisation.

L'orientation vers le logiciel libre représente également un atout majeur pour pérenniser les développements, en faciliter l'accès et réduire les coûts de diffusion.

Les perspectives exposées dans le chapitre suivant s'appuieront en grande partie sur l'amélioration de cet outil, [PyScada](#).

Références personnelles

- [18] F. LUTHON et B. LARROQUE. « Remote Laboratory for Game-Based Distance Learning in Electronics ». In : *Proceedings of the 4th International Conference on Electronics, Communications and Networks*, 15 déc. 2014. ISBN : 978-1-138-02830-2. DOI : [10.1201/b18592-279](https://doi.org/10.1201/b18592-279).

Références

- [1] D. EVANS. « How the Next Evolution of the Internet Is Changing Everything ». In : *Cisco Internet Business Solutions Group (IBSG)* (2011), p. 11.
- [2] O. J. REICHMAN, M. B. JONES et M. P. SCHILDHAUER. « Challenges and Opportunities of Open Data in Ecology ». In : *Science* 331.6018 (11 fév. 2011), p. 703-705. DOI : [10.1126/science.1197962](https://doi.org/10.1126/science.1197962).
- [3] M. D. WILKINSON et al. « The FAIR Guiding Principles for Scientific Data Management and Stewardship ». In : *Scientific Data* 3.1 (15 mars 2016), p. 160018. ISSN : 2052-4463. DOI : [10.1038/sdata.2016.18](https://doi.org/10.1038/sdata.2016.18).
- [4] G. PITRON. *L'enfer numérique*. Les liens qui libèrent, 2021. 350 p.
- [5] A.-L. LAMPRECHT et al. « Towards FAIR Principles for Research Software ». In : *Data Science* 3.1 (1^{er} jan. 2020), p. 37-59. ISSN : 2451-8484. DOI : [10.3233/DS-190026](https://doi.org/10.3233/DS-190026).
- [6] T. BERNERS-LEE, J. HENDLER et O. LASSILA. « The Semantic Web : A New Form of Web Content That Is Meaningful to Computers Will Unleash a Revolution of New Possibilities ». In : *ScientificAmerican.com* (1^{er} mai 2001).
- [7] LÉGIFRANCE. *Loi N° 2004-575 Du 21 Juin 2004 Pour La Confiance Dans l'économie Numérique*. URL : <https://www.legifrance.gouv.fr/loda/id/LEGITEXT000005789847/>.
- [8] R. C. JIMÉNEZ et al. « Four Simple Recommendations to Encourage Best Practices in Research Software ». In : *F1000Research* (13 juin 2017). DOI : [10.12688/f1000research.11407.1](https://doi.org/10.12688/f1000research.11407.1).
- [9] DINUM. *Référentiel général d'interopérabilité (RGI)*. Direction Interministérielle du Numérique et du Système d'Information et de Communication de l'Etat. Déc. 2015. URL : <https://www.numerique.gouv.fr/publications/interopabilite/>.
- [10] A. DE MAURO, M. GRECO et M. GRIMALDI. « A Formal Definition of Big Data Based on Its Essential Features ». In : *Library Review* 65.3 (1^{er} jan. 2016), p. 122-135. ISSN : 0024-2535. DOI : [10.1108/LR-06-2015-0061](https://doi.org/10.1108/LR-06-2015-0061).
- [11] E. COMMISSION. *Antitrust : la Commission se félicite de la confirmation par le TPI de sa décision sanctionnant deux abus de position dominante dans l'affaire Microsoft*. URL : https://ec.europa.eu/commission/presscorner/detail/fr/MEMO_07_359.
- [12] A. GOPSTEIN, C. NGUYEN, C. O'FALLON, N. HASTINGS et D. A. WOLLMAN. « NIST Framework and Roadmap for Smart Grid Interoperability Standards, Release 4.0 ». In : *NIST Special Publication* (17 fév. 2021).
- [13] S. HEILER. « Semantic Interoperability | ACM Computing Surveys ». In : *ACM Computing Surveys*, Vol. 27, No 2 (1995).
- [14] C. LAVAYSSIERE. « Supervision et instrumentation à distance, libre et interopérable, du capteur à l'utilisateur. » 2022PAUU3041. Thèse de doct. 2022.

- [15] JOHN JOSEPH ROETS. *Emelope - Service Oriented Architecture - Enterprise Application Integration - General Messaging Framework*. Notice logicielle. 28 sept. 2007.
- [16] D. HUANG et H. WU. « Chapter 2 - Virtualization ». In : *Mobile Cloud Computing*. Sous la dir. de D. HUANG et H. WU. Morgan Kaufmann, 1^{er} jan. 2018, p. 31-64. ISBN : 978-0-12-809641-3. DOI : [10.1016/B978-0-12-809641-3.00003-X](https://doi.org/10.1016/B978-0-12-809641-3.00003-X).
- [17] D. PARNIEWICZ et al. « Design and Implementation of an OpenFlow Hardware Abstraction Layer ». In : *Proceedings of the 2014 ACM SIGCOMM Workshop on Distributed Cloud Computing*. DCC '14. New York, NY, USA : Association for Computing Machinery, 18 août 2014, p. 71-76. ISBN : 978-1-4503-2992-7. DOI : [10.1145/2627566.2627577](https://doi.org/10.1145/2627566.2627577).

Sommaire

7.1 Contexte	123
7.2 Instrumentation pour le génie côtier	124
7.2.1 WIP	124
7.2.2 Station de mesure de la digue de l'Artha	127
7.2.3 Canal de rupture de barrage	128
7.3 Instrumentation pour le suivi énergétique de bâtiment	129
7.4 Traitement d'image / Photogrammétrie	129
7.4.1 Suivi des blocs de protection d'ouvrages de défense côtiers	129
7.4.2 Différenciation de nuages de points	129
7.4.3 Comparaison d'orthophotographies	131
7.4.4 Modélisation des blocs et suivi de déplacement	131
7.5 Traitement de signal / Intelligence artificielle	132
7.5.1 Prédiction des pressions d'impact des vagues	132
7.5.2 Efficacité énergétique dans le bâtiment	132
7.5.3 Techniques d'IA pour le suivi et l'optimisation des consommations énergétiques dans le bâtiment	133
7.6 Supervision logicielle	134
Références personnelles	135
Références	135

7.1 Contexte

Les activités de recherche que j'ai menées depuis ma thèse se sont diversifiées, s'orientant vers le développement d'une instrumentation couplée à un système de supervision permettant de collecter des données sur des systèmes multi-physiques. Depuis mon recrutement à l'**UPPA**, ces recherches m'ont permis d'acquérir une adaptabilité favorisant les collaborations avec d'autres communautés scientifiques. Parmi celles-ci on peut notamment mentionner la collaboration avec :

- l'équipe **IVS** depuis 2014 avec laquelle j'ai pu être impliqué dans divers projets visant à développer et exploiter des stations de mesure continue des impacts de vagues et à gérer des stations vidéo observant le déferlement sur la côte basque. Lors de ces collaborations j'ai pu encadrer des travaux de thèse et de stages de Master (voir chapitre

- 10), mais également pu contribuer à des collaborations externes se concrétisant par des contrats de recherche de collaboration (voir chapitre 11)
- le laboratoire LIUPPA, avec une interaction forte avec mon collègue Franck Luthon avec qui je partage également la co-conception de plusieurs enseignements à l'IUT de Bayonne. La grande majorité des travaux valorisés par les thèses que j'ai pu co-encadrer ou co-diriger ont pu être faits grâce à la complémentarité des compétences que nous avons su associer (voir chapitre 10).
 - l'UMR Ecobiop, en mettant en place un système d'information capable d'analyser des vidéos afin d'en extraire des indicateurs sur le comportement de certains poissons. Lors de ces travaux, j'ai pu co-encadrer la thèse de Nawal El Drogi ; les poissons étudiés étaient les civelles. Dans le cadre de la co-direction du stage de Master de Frédéric Bertin, il s'agissait des aloses (voir chapitre 10).
 - le laboratoire LATEP depuis 2025, et notamment mon collègue Stéphane Gibout avec qui nous avons des perspectives concernant l'optimisation de la consommation énergétique dans les bâtiments (projet [Laborenergie](#)). Cette collaboration se concrétise grâce au financement région [PSGAR](#) CERENA : Contribution de la Nouvelle-Aquitaine à la souveraineté énergétique nationale juste et bas carbone portée par l'[UPPA](#) et dans laquelle nous avons en charge le *Work Package 2* via le projet **Démarche d'Optimisation Énergétique basée sur l'acquisition, la supervision et le pilotage des Bâtiments (DOÉBât)**. Plusieurs entreprises, collectivités et établissements publics s'intéressent à la flexibilité, la gratuité et l'interopérabilité de cette solution.

La collaboration avec l'équipe [IVS](#) continue et nous travaillons sur le développement de stations d'impact mobiles [WIP](#). La conception de systèmes de mesure a été largement inspirée par l'expérimentation de la digue de l'Artha décrite dans le chapitre 5. L'objectif de cette instrumentation est de capter les pressions et forces induites par les vagues de submersion.

L'instrumentation de falaises avec un équipement similaire est en cours d'étude afin de fournir des données permettant d'étudier plus en détail leur érosion. Les résultats issus de ces études permettent aux chercheurs de l'équipe [IVS](#) de confronter leur modèle aux résultats obtenus lors du déploiement d'une instrumentation *in-situ*. Une autre perspective intéressante avec l'équipe [IVS](#) concerne le traitement d'image et la vision par ordinateur. Le traitement d'image 2D et 3D peut être très utile notamment lorsque que l'on souhaite suivre le déplacement de blocs de protections des ouvrages en comparant des mesures issues de la photogrammétrie. De plus, la station vidéo de Socoa supervisée par [PyScada](#) nous procure des vidéos des déferlements qu'il est intéressant de corrélérer avec les signaux enregistrés sur la digue de l'Artha.

7.2 Instrumentation pour le génie côtier

Les résultats issus des stations [WIP](#) et des stations de mesures à demeure sur site naturel doivent permettre de contribuer aux problématiques scientifiques suivantes :

- Quels sont les processus physiques intervenant lors du franchissement (overtopping) des ouvrages côtiers par les vagues pendant les tempêtes ?
- Comment obtenir des données quantitatives fiables sur les impacts mécaniques des vagues de franchissement à partir de mesures in situ ?

7.2.1 [WIP](#)

L'objectif des instrumentations déployées dans les [WIPs](#) est de capter les pressions et forces induites par les vagues de submersion et d'analyser plus particulièrement les signaux

d'impact.

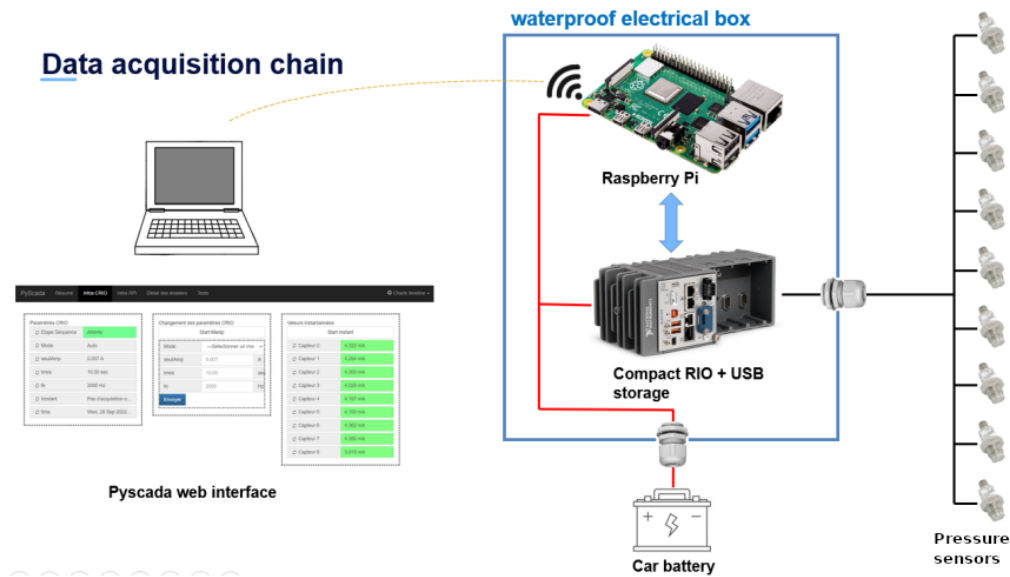


FIGURE 7.1 – Schéma global de la chaîne d'acquisition des WIP.

Cette station est équipée de plusieurs capteurs de pression piezorésistifs similaires à ceux utilisés sur la station de l'Artha décrite dans la section 5.1.2 mais avec des étendues de mesures plus faibles (0 à 1 bar pour le capteur du bas et 0 à 0.5 bar pour les autres capteurs). Cette station ne nécessite pas de système photovoltaïque ni de routeur 4G car les WIP sont déployées sur le continent et seront toujours accessibles à marée basse ce qui facilite la recharge de la batterie et le rapatriement des données (voir figure 7.1). Certaines stations WIP sont équipées de caméras Go-Pro pour synchroniser la vidéo de l'impact avec les séries temporelles des capteurs de pression.

Ainsi cette station déployée dans le cadre des travaux de thèse d'Erwan Imbertie [2] a permis de décomposer des phases d'impact présentées dans la figure 7.2. Sur cette figure les différentes phases sont décrites ci-dessous :

- (A) **Phase d'impact initial**,
- (B) **Phase de déviation ascendante**,
- (C) **Montée maximale (runup)**,
- (D) **Phase de réflexion initiale**,
- (E) **Phase hydrostatique**.

La **colonne de gauche** montre la série temporelle des forces en kN/m . L'instant représentatif de chaque phase est marqué par un point noir. L'instant du *début de l'impact* et celui de la *montée maximale (runup)* sont identifiés respectivement par une ligne pointillée noire et une ligne pointillée rouge. La **colonne centrale** présente la distribution verticale instantanée de la pression enregistrée (p_{wip}), ainsi que le profil hydrostatique (p_{hydro}). La **colonne de droite** fournit la vidéo synchronisée.

D'autres WIP ont été et vont être conçues sur le même principe. Sur la figure 7.3.(a) on peut visualiser la WIP1, utilisée dans le cadre des travaux de thèse d'Erwan Imbertie et la WIP2 (figure 7.3.(b)) conçue à la demande de la mairie de Biarritz en collaboration avec le laboratoire LFCR et le laboratoire SIAME. Mardi 26 mars, la WIP2 a donc été déployée dans un bloc de béton bas carbone à base de coquilles et équipé de 6 capteurs de pression installé sur la promenade de la grande plage de Biarritz.

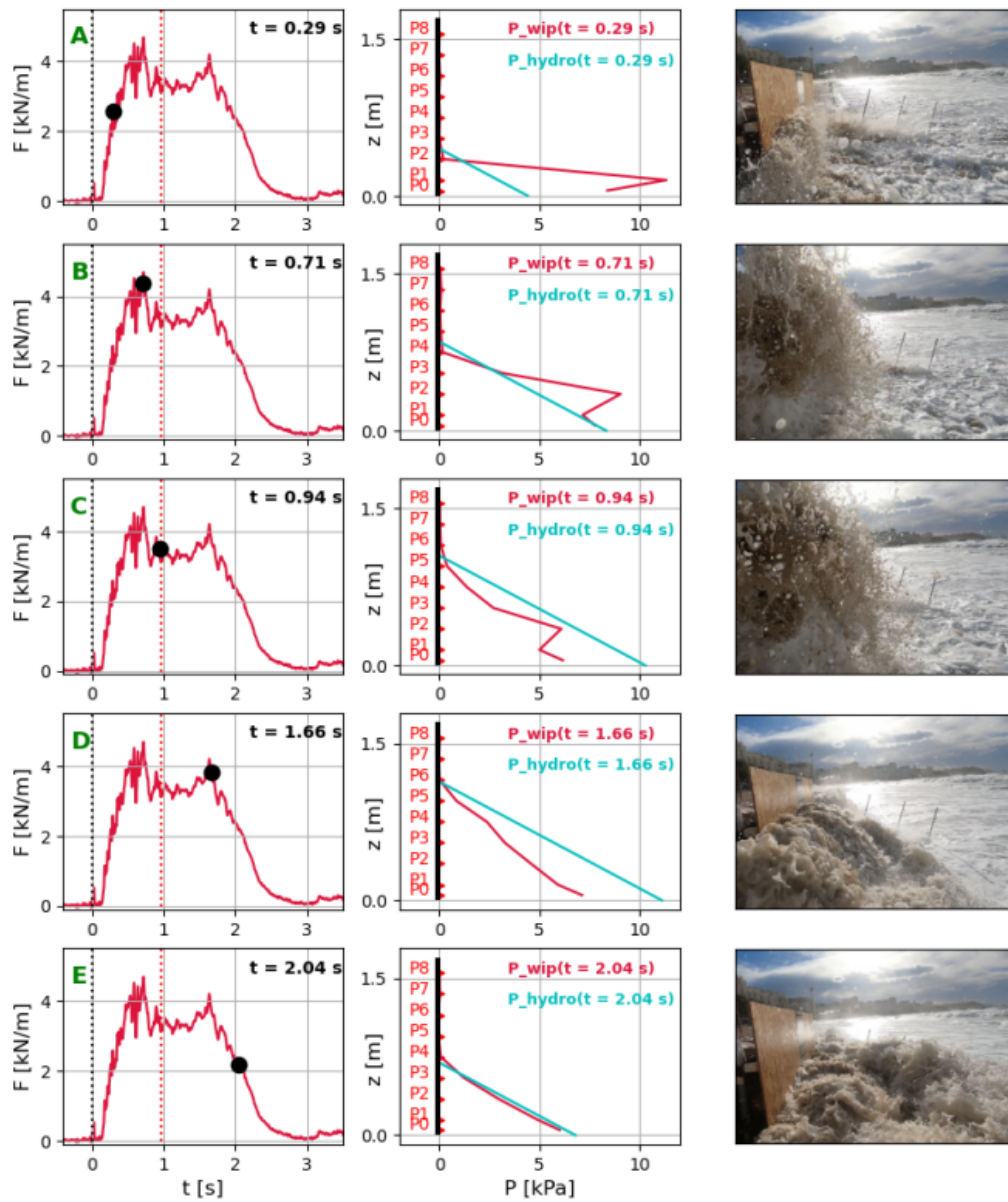


FIGURE 7.2 – Décomposition des phases d'un impact d'une vague submersion le 4 mars 2022 sur la grande plage de Biarritz [1].

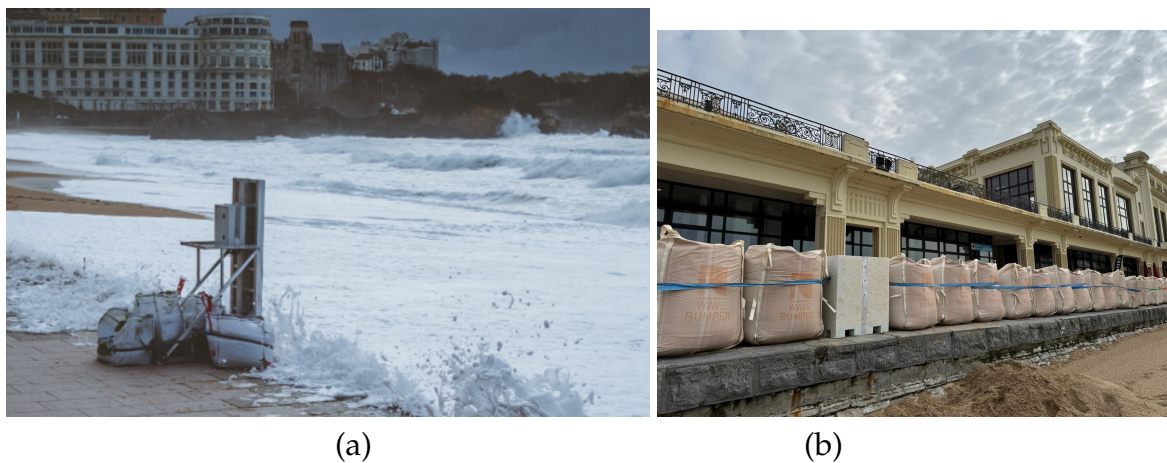


FIGURE 7.3 – WIP1 (a) et WIP2 (b) déployées sur la grande plage de Biarritz.

La WIP3 est actuellement en conception et sera prochainement déployée à Capbreton, toujours pour contribuer à répondre aux problématiques scientifiques énoncées au début de la section avec une particularité du site de Capbreton due au Gouf qui pourrait être à l'origine d'ondes infra-gravitaires pouvant accentuer l'amplitude des vagues de submersion.

7.2.2 Station de mesure de la digue de l'Artha

La station de la digue de l'Artha continue d'être maintenue et de fournir des résultats depuis 2014. Seulement 2 capteurs sur 16 ne répondent plus depuis leur déploiement ce qui rend la station encore exploitable.

Une première perspective concernant l'instrumentation de la digue de l'Artha va consister à **améliorer l'autonomie énergétique de la station**. En effet, nous avons du mal en période hivernale à disposer de suffisamment d'énergie pour assurer une continuité des mesures, ce qui contraint à intervenir parfois pour changer la batterie. Nous ne disposons pas d'assez de place pour ajouter une batterie, il devient alors nécessaire d'économiser l'énergie avec un meilleur pilotage de la station. Nous souhaitons profiter de la proximité de la station de Socoa connectée au réseau électrique ainsi qu'au réseau internet. Un émetteur **LoRa** pourrait communiquer avec un module **LoRa**, bien connu pour sa longue portée et sa basse consommation, de la station de l'Artha qui pourrait "réveiller" l'ensemble de la station (routeur, station de mesure et **SBC**). En effet, comme le montre la figure 7.4, ce système pourrait contribuer à une économie d'énergie sur la station. Une instrumentation du système photovoltaïque (charge et autonomie de la batterie) pourrait également être très utile pour mieux superviser l'installation.

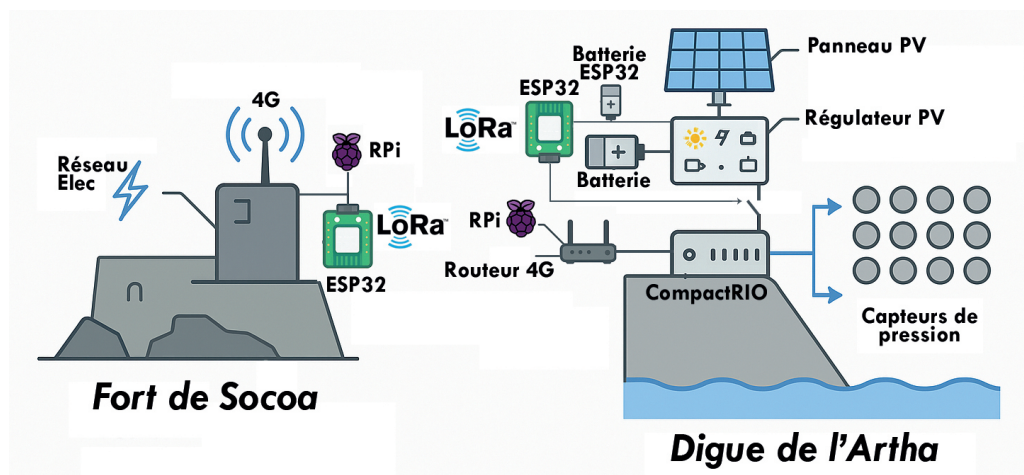


FIGURE 7.4 – Communication **LoRa** entre le fort de Socoa et la digue de l'Artha pour le contrôle de l'alimentation de la station de mesures.

Une deuxième perspective, qui pourrait aussi concerner les **WIP** présentées à la section précédente, consisterait à **mesurer l'air enchâssé dans la vague ainsi que le taux d'aération** de la lame d'eau déferlant sur la digue. En effet, dans [3] ce type de mesure a déjà été effectué mais avec des fréquences d'acquisition inférieures à celles que nous pourrions utiliser de nos jours. Cette meilleure résolution temporelle couplée à une acquisition de longue durée sur la digue permettrait d'affiner les modèles en considérant de manière plus juste l'influence de l'air dans les vagues.

7.2.3 Canal de rupture de barrage

Les travaux de recherche de l'équipe [IVS](#) sur les déferlements hydromécaniques s'appuient sur des modèles principalement issus des équations de mécanique des fluides mais également de mesures *in-situ* dont une partie a été décrite dans les sections précédentes. Afin d'améliorer les connaissances de l'équipe il s'est avéré nécessaire de concevoir un banc de laboratoire permettant de générer des vagues par lâcher de barrage. Ainsi nous avons conçu un canal instrumenté dont l'objectif concerne :

- l'étude des impacts d'une ou plusieurs vagues sur des obstacles,
- l'étude des vagues générées par glissement de fluides de différentes rhéologies, milieux granulaires, solides.

J'ai contribué au dimensionnement et à l'instrumentation de ce banc de test qui fait désormais partie du plateau technique de l'[UPPA](#) (UPPA Tech). Une photographie de ce banc de test est visible en figure [7.5](#).

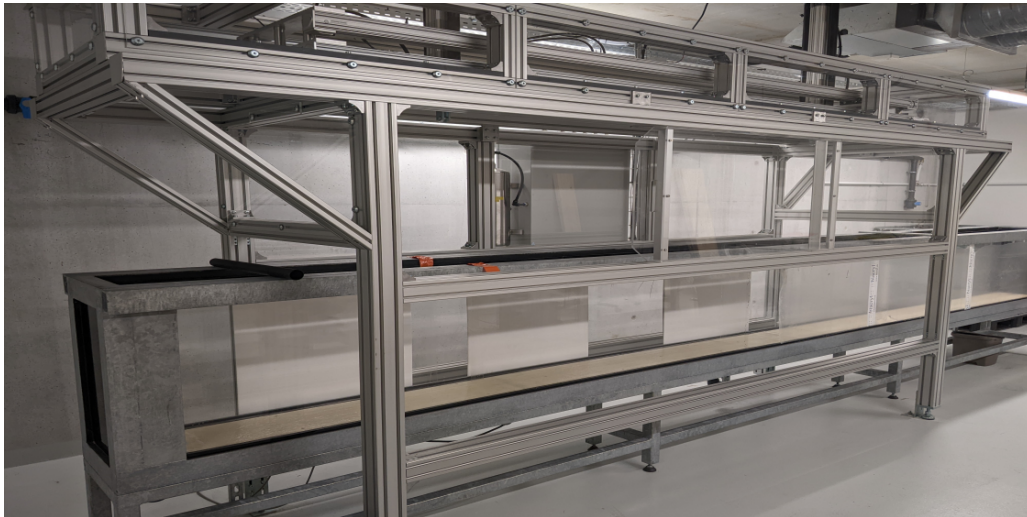


FIGURE 7.5 – Photo du canal de rupture de barrage.

Afin d'obtenir des informations sur les manipulations, l'instrumentation déployée sur ce canal se compose de :

- une armoire électrique équipée d'une automate pilotant un système électropneumatique de commande des portes permettant de déclencher une ouverture rapide pour libérer une colonne d'eau générant une vague,
- un système de vision par ordinateur filmant l'intégralité du déferlement le long du canal à l'aide de quatre caméras à haute définition,
- un réseau de jauges mesurant la hauteur de l'eau dans différents du canal,
- un système de paroi d'impact instrumenté pour mesurer les pressions d'impact.

Outre les différentes configurations exploitables pour différents cas d'études des déferlements, une des perspectives concernant l'instrumentation concerne l'acquisition synchronisée des différents instruments équipant le canal. Cette fonctionnalité permettrait de garantir la répétabilité des tests ainsi que la facilité de traitement des données issues des séries temporelles et des acquisitions vidéo.

7.3 Instrumentation pour le suivi énergétique de bâtiment

Le contexte réglementaire, via la mise en œuvre du décret tertiaire jusqu'à l'horizon 2050 a fait augmenter l'intérêt vers certains défis scientifiques et technologiques relatifs à l'efficacité énergétique dans le bâtiment. Le projet [PSGAR](#) Doebat va contribuer à répondre aux problématiques scientifiques suivantes :

- Comment concevoir des capteurs à faible coût, interopérables, non intrusifs et durables dans le temps ?
- Quels algorithmes d'agrégation permettent d'assurer la fiabilité des données tout en minimisant les ressources informatiques ?

En collaboration avec le LIUPPA et plus particulièrement les travaux de Congduc Pham (PR 27) sur l'Internet des objets (IoT) et les systèmes de capteurs en [LoRa](#), mais aussi en collaboration avec Stéphane Gibout du LATEP (MCF 62) et ses travaux sur les IoT dans le bâtiment, il est pertinent de développer des IoT à faible coût, interopérables et open hardware pour faciliter leur déploiement et ainsi fournir une multitude de données pour caractériser finement les consommations énergétiques (plan de comptage par usage énergétique et/ou par secteur) mais aussi les conditions de confort des usagers (données environnementales telles que la température, l'hygrométrie, le taux de CO_2).

Ces IoT modulaires libres de droit seront en interaction avec le système de supervision [PyScada](#) présenté au chapitre 6. Les perspectives d'intégration dans [PyScada](#) seront présentées à la section 7.6.

7.4 Traitement d'image / Photogrammétrie

7.4.1 Suivi des blocs de protection d'ouvrages de défense côtiers

Les travaux développés dans la thèse de Fawzi Khattar [4] relatifs au suivi d'objets en 3 dimensions et plus généralement relatifs à l'exploitation des images issues d'un drone conduisant au nuage de points seront mis à contribution dans les perspectives présentées dans cette partie.

La photogrammétrie est une technique de relevé tridimensionnel utilisée pour mesurer avec une précision centimétrique des structures de défense côtière (en particulier la digue de l'Artha) à partir de prises de vues aériennes. En collaboration avec mes collègues océanographes de l'équipe [IVS](#), son application au suivi des ouvrages côtiers me permet d'évaluer les déplacements, les érosions et les dégradations des infrastructures côtières.

Lors de mon semestre de CRCT, de septembre 2024 à février 2025, j'ai pu finaliser l'examen pratique de ma formation de télépilote et ainsi obtenir le permis en septembre 2024. J'ai également recherché différentes techniques de traitement pour assurer un suivi précis.

7.4.2 Différenciation de nuages de points

J'analyse et compare les nuages de points générés à partir de relevés aériens effectués à différentes périodes de l'année (idéalement avant et après tempête en visant des journées avec de forts coefficients) afin de détecter d'éventuels déplacements des blocs protégeant la digue ou des déformations de la structure de la digue elle-même. Des techniques comme l'algorithme *ICP* (Iterative Closest Point) ou la distance de Hausdorff peuvent être utilisées pour quantifier les variations et déterminer les déplacements locaux des éléments structuraux. J'ai eu l'occasion de tester l'algorithme ICP grâce à l'outil logiciel CLOUD COMPARE. L'algorithme ICP est utilisé pour aligner deux nuages de points en minimisant la distance entre eux. Soit $P = \{p_i\}$ et $Q = \{q_j\}$ deux ensembles de points dans $\mathbb{R}^3$, l'objectif est de

trouver une transformation rigide (R, T) (rotation et translation) qui minimise l'erreur quadratique suivante :

$$E(R, T) = \sum_i \|Rp_i + T - q_{\text{cor}(i)}\|^2 \quad (7.1)$$

où $q_{\text{cor}(i)}$ est le point correspondant à p_i dans Q , obtenu généralement par une correspondance basée sur la distance euclidienne la plus proche.

L'algorithme suit les étapes suivantes :

1. **Initialisation** : Choisir une estimation initiale de R et T .
2. **Correspondance** : Pour chaque point $p_i \in P$, associer un point $q_{\text{cor}(i)} \in Q$ basé sur la plus courte distance euclidienne.
3. **Optimisation** : Trouver la transformation (R, T) qui minimise $E(R, T)$, souvent en utilisant la méthode des moindres carrés par décomposition en valeurs singulières (SVD).
4. **Mise à jour** : Appliquer la transformation trouvée à P .
5. **Convergence** : Répéter les étapes 2 à 4 jusqu'à convergence, c'est-à-dire jusqu'à ce que l'erreur $E(R, T)$ devienne inférieure à un seuil donné ou qu'un nombre maximal d'itérations soit atteint.

L'erreur de reconstruction $E(R, T)$ permet de quantifier les déplacements des blocs ainsi que les changements structuraux sur la digue de l'Artha.

Ces travaux méritent d'être approfondis, automatisés et enrichis. Un des objectifs est d'augmenter la fréquence des relevés photogrammétriques afin d'affiner le suivi des déplacements au cours du temps. L'utilisation du logiciel libre CLOUD COMPARE laisse envisager l'implantation de différents traitements sous forme de *plug-in* en Python.

Les premiers résultats que j'ai pu obtenir en différenciant deux nuages de points acquis en 2018 et en 2024 sont visibles en figure 7.6. Cette analyse a pu être réalisée en collaboration avec M. Christophe Bagieu enseignant au Lycée Cantau d'Anglet ainsi qu'avec les élèves de la promotion 2024-2025 de la licence professionnelle Géo3D.

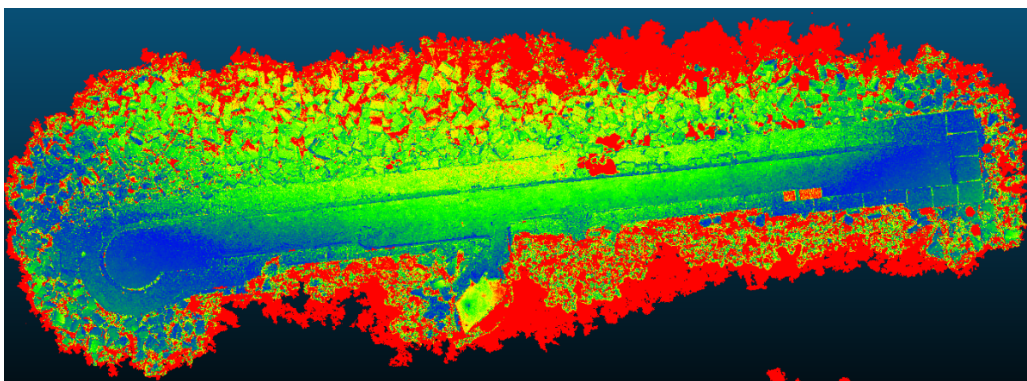


FIGURE 7.6 – Différence entre deux nuages de points de la digue de l'Artha acquis en 2018 et en 2024.

Cette première analyse sommaire fait apparaître de forts changements (supérieurs à 50cm) colorisés en rouge sur la figure 7.6. Seuls les points rouges à proximité de l'ouvrage sont à considérer car ils sont significatifs de mouvements de blocs. Les points à l'extérieur sont engendrés par une différence du niveau d'eau lors des deux acquisitions photogrammétriques.

7.4.3 Comparaison d'orthophotographies

A partir des prises de vues aériennes permettant de générer des nuages de points de la digue j'ai également la possibilité de générer des orthophotographies (ou orthoimages). L'orthophotographie est une image aérienne géoréférencée et rectifiée, corrigée des déformations liées à la perspective et au relief. Ainsi entre 2 orthophotographies des techniques de traitement d'images pour l'estimation des mouvements peuvent être appliquées :

Différence d'images

La méthode la plus simple consiste à calculer la différence entre deux images successives :

$$D(x, y) = I_t(x, y) - I_{t-1}(x, y) \quad (7.2)$$

où $I_t(x, y)$ et $I_{t-1}(x, y)$ sont les intensités des pixels aux temps t et $t - 1$. Cette méthode met en évidence les pixels ayant changé entre deux instants mais est sensible au bruit et aux variations d'illumination. L'illustration en figure 7.7 représente 2 orthoimages issues de deux campagnes photogrammétriques que j'ai pu effectuer avec deux drones différents en 2018 et en 2024.

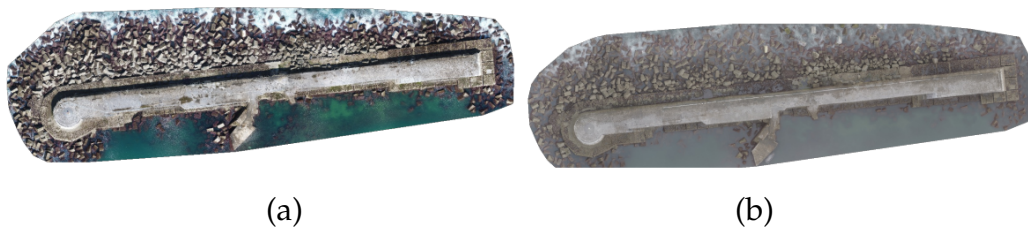


FIGURE 7.7 – Orthoimage de la digue de l'Artha en 2018 (a) et en 2024 (b).

Analyse du flux optique

L'analyse du flux optique permet d'estimer un champ de déplacement (u, v) entre deux images successives. Parmi les méthodes classiques, on peut citer :

- **Méthode de Lucas-Kanade** : approche locale basée sur une approximation affine.
- **Méthode de Horn-Schunck** : approche qui introduit une régularisation pour assurer un flux spatialement lisse.

L'approche basée sur le flux optique peut être pertinente pour suivre sur le long terme les mouvements des blocs de la digue lorsque plusieurs orthoimages ont été réalisées. Lors de la thèse de Nawal Eldrogi [5], dont les travaux ont été présentés au chapitre 4 ces techniques de suivi de mouvements ont pu être mises en œuvre sur un cas applicatif différent. L'expérience et les résultats acquis lors de ces travaux vont être de nouveau mis en œuvre lors de mes prochains travaux.

7.4.4 Modélisation des blocs et suivi de déplacement

En intégrant des modèles numériques de terrain et en appliquant des algorithmes de reconnaissance de formes basés sur la segmentation d'image, il est possible de suivre le mouvement des blocs constitutifs de la digue. Un échange avec la société *ID Ocean* m'a permis de découvrir la solution SEABIM®. Ce procédé breveté permet, à partir de relevés photogrammétriques ou lidar, de générer automatiquement un jumeau numérique précis des

blocs de protection des digues. L'algorithme identifie individuellement chaque bloc (position, orientation, volume), et reconstitue une maquette 3D fidèle à la réalité. Cette modélisation contribue à effectuer un suivi spatial et temporel des blocs, facilitant la détection de mouvements, de déchaussements ou de cassures. Une collaboration avec *ID Ocean* pourrait contribuer à alimenter nos travaux de recherche afin de corrélérer les conditions de mer que nous supervisons avec les mouvements de blocs.

7.5 Traitement de signal / Intelligence artificielle

7.5.1 Prédiction des pressions d'impact des vagues

Les travaux initiés dans la thèse de Dorian D'amico [6] et Pierre-Antoine Poncet [7] méritent d'être poursuivis en tirant bénéfice des algorithmes issus de l'IA. Concernant la classification des impacts dans un flux massif de données en plusieurs *clusters* l'utilisation de modèles auto-supervisés ou *deep clustering* pourrait être mise à profit. De plus, l'intégration de modèles d'apprentissage contrastif, capables de reconnaître des impacts rares ou extrêmes comme des anomalies ou *outliers*, serait bénéfique pour identifier certains phénomènes extrêmes comme des vagues scélérates.

7.5.2 Efficacité énergétique dans le bâtiment

Afin de tendre vers une meilleure efficacité énergétique plusieurs champs d'action sont possibles :

- Procéder à une meilleure régulation des systèmes. En effet, les systèmes de contrôles des installations techniques liées au bâtiment (systèmes CVC, éclairage, prise de courant, micro-informatique) sont souvent régulés sans tenir compte de la vie du bâtiment en termes d'occupation notamment,
- Changer des systèmes techniques énergivores. L'évolution technologique de certains systèmes permet d'envisager de meilleurs rendements énergétiques réduisant ainsi les consommations énergétiques,
- Procéder à des travaux structurels dans le bâtiment. Certains travaux sur l'enveloppe du bâtiment permettraient d'économiser de l'énergie liée :
 - au chauffage ou au rafraîchissement en travaillant sur l'isolation,
 - à l'éclairage via l'installation de puits de jours ou de nouveaux ouvrants pour bénéficier d'une lumière naturelle,
- Installer des systèmes de productions d'énergie locale afin de produire tout ou partie de l'énergie consommée par le bâtiment.
- Agir sur le comportement de l'utilisateur en l'informant et en le responsabilisant sur son impact énergétique au sein du bâtiment.

Quels que soient les champs d'action envisagés, il est nécessaire de connaître précisément la répartition des consommations d'énergie dans le bâtiment. Ceci suppose la mise en œuvre d'un plan de comptage adapté aux spécificités du site (définition des différents postes de consommation) ou, à défaut, le déploiement de capteurs permettant de mesurer et collecter les données énergétiques. La mise en place d'un système de supervision associé au comptage offre également la possibilité d'interagir avec les usagers et gestionnaires du bâtiment, tout en assurant le pilotage des systèmes techniques liés à son fonctionnement. Dans cette perspective, les démarches visant l'efficacité et la sobriété énergétique doivent s'appuyer sur des méthodes ouvertes, interopérables, décentralisées et répliquables localement, afin de faciliter leur adoption à grande échelle.

7.5.3 Techniques d'IA pour le suivi et l'optimisation des consommations énergétiques dans le bâtiment

Les masses de données déjà acquises dans l'instrumentation de certains bâtiments de l'UPPA nous permettent d'envisager de mettre en œuvre certaines techniques issues du monde de l'IA. L'usage de ces techniques sera destiné à analyser, prévoir et optimiser les consommations énergétiques au sein de bâtiments pilotes de l'Université et de certaines collectivités territoriales dans le cadre du projet PSGAR. Ainsi les problématiques scientifiques qui en découlent peuvent être listées ci-dessous :

- Quelles méthodes d'IA pour interpréter des données massives hétérogènes issues de bâtiments intelligents ?
- Comment construire des modèles prédictifs tenant compte des usages, des aléas climatiques et des dégradations des équipements ?

Analyse et prévision des consommations

L'apprentissage supervisé s'appuie sur l'utilisation de modèles de *machine learning* du type réseaux neuronaux, forêts aléatoires ou *XGBoost* et l'objectif est de prédire les consommations à partir de l'historique des données. Le paramétrage et la comparaison des résultats issus de ces algorithmes vont être possibles grâce à l'usage de plateforme de big data et à la création de nouveaux *plugins* dans le logiciel *PyScada*.

L'exploitation des **séries temporelles** issues de notre base de données utilisées comme entrées dans des algorithmes comme *ARIMA* (Autoregressive Integrated Moving Average, technique d'analyse des séries temporelles et de forecasting des valeurs futures possibles d'une série temporelle) ou *Prophet* (modèle bayésien de séries structurelles chronologiques) pourraient nous permettre d'anticiper les pics de consommation, d'alerter les usagers ou les gestionnaires et ainsi d'optimiser la gestion énergétique.

Optimisation en temps réel

Le déploiement de systèmes de supervision ouverts offrira l'opportunité d'intégrer des algorithmes intelligents capables de prendre des décisions en temps réel. Ainsi des techniques basées sur des **Systèmes multi-agents** (*Deep Q-Learning* par exemple) permettent d'adapter en temps réel le chauffage, la climatisation et l'éclairage en fonction des besoins des usagers et des prévisions météorologiques. L'utilisation des **Jumeaux numériques** donne l'opportunité de mettre en place de la *STD* et il devient alors envisageable de tester différentes stratégies d'optimisation énergétique avant leur mise en œuvre réelle. Certains collègues du LATEP avec qui je collabore dans le cadre du projet PSGAR maîtrisent la mise en œuvre d'une *STD* et nos travaux de recherche dans le cadre du PSGAR vont notamment être axés sur ce sujet.

Énergies renouvelables et stockage intelligent

L'**Optimisation des flux énergétiques** consiste à gérer la production d'énergie intermittente (solaire ou éolien principalement) et le stockage pour **maximiser l'autoconsommation** et minimiser l'achat d'énergie sur le réseau. En effet il est beaucoup plus intéressant financièrement d'auto-consommer l'énergie produite car le tarif de rachat n'est pas attractif. En effet, si l'incitation de revente était forte cela impliquerait de fortes problématiques sur le dimensionnement du réseau électrique. Ainsi, le **stockage de l'énergie** est une solution pour favoriser l'autoconsommation. La gestion de ce *smart-grid* doit alors être faite intelligemment afin d'assurer une modularité, une flexibilité et un fonctionnement en temps réel. Des

échanges assez avancés avec l'équipe de l'ESTIA (École d'ingénieurs à Bidart), en charge de la plateforme *Energea*, laissent entrevoir certaines perspectives pour la mise en place d'un système de supervision intelligent pour le pilotage de leur smart-grid.

7.6 Supervision logicielle

Suite aux travaux de thèse de Camille Lavyssière [8] plusieurs perspectives liées au développement du logiciel de supervision [PyScada](#) sont envisagées. L'approche que nous avons adopté dans les travaux de thèse présente de manière **empirique** une méthode pour la supervision et l'instrumentation à distance à partir d'applications dans les domaines de l'éducation, l'énergie et l'environnement et les secteurs de l'enseignement, de la recherche ou de l'industrie. Comme abordé dans le chapitre 6 les lignes directrices du [FAIR](#) des données, des logiciels et des algorithmes ont été appliquées à la problématique de solutions logicielles génériques et agnostiques du domaine d'étude pour la supervision, l'instrumentation et l'expérimentation. Une des perspectives consiste à décentraliser tous les éléments (instruments, variables, objets graphiques) parmi des instances fédérées, c'est-à-dire interconnectées. Par exemple les éléments graphiques des pages de l'interface pourraient être intégrés dans l'interface utilisateur d'une autre instance de [PyScada](#). La décentralisation contribuera à limiter les restrictions d'accès, à répartir la bande passante permettant ainsi de fiabiliser l'accès à la supervision.

Afin d'accentuer l'approche générique dans la gestion des variables d'entrée et de sortie, il est nécessaire de lui attribuer, ainsi qu'à tout objet qu'il contient, un PID et des métadonnées. Une des perspectives nécessitera de **proposer une autorité de gestion des PID** (en utilisant par exemple l'[ARK](#)) pour les logiciels de supervision. Cette gestion s'inscrira ainsi dans les trois principes du [FAIR](#), à savoir trouver, accéder et réutiliser les données.

L'architecture modulaire de [PyScada](#) nous offre également beaucoup de perspectives pour travailler en collaboration avec des entreprises du bâtiment ou des collectivités afin de proposer une solution pour l'optimisation des flux énergétiques au sein d'un bâtiment.

A l'instar du développement matériel *open source* développé pour les travaux pratiques à distance (*Laborem Box*) notre équipe de recherche souhaite développer du matériel *low-cost* et ouvert pour les autres applicatifs sur lesquels nous travaillons :

- une instrumentation légère pour le comptage énergétique,
- une instrumentation haute performance et robuste pour l'observation des vagues en milieu extrême.

Références personnelles

- [1] E. IMBERTIE, D. MORICHON, M. DELPEY, B. LARROQUE et C. LAVAYSSIÈRE. « Field study of post-overtopping flow impacts on a vertical wall at the crest of an upper-beach dike ». In : *Applied Ocean Research* 163 (2025), p. 104731. ISSN : 0141-1187. DOI : <https://doi.org/10.1016/j.apor.2025.104731>.

Références

- [2] E. IMBERTIE. « Characterization of the impact of storm wave overtopping on a vertical structure at the top of an upper-beach dike based on field measurements and phase-resolving depth-integrated numerical modeling ». Thèse. Université de Pau et des Pays de l'Adour, oct. 2024.
- [3] G. BULLOCK, A. CRAWFORD, P. HEWSON, M. WALKDEN et P. BIRD. « The influence of air and scale on wave impact pressures ». In : *Coastal Engineering* 42.4 (2001), p. 291-312.
- [4] F. KHATTAR. « Enriching Remote Labs with Computer Vision and Drones ». Thèse de doct. Anglet, France : University of Pau & Pays Adour, 2018.
- [5] N. ELDRUGI. « Vision par ordinateur poursuivi automatique et caractérisation de comportement de civelles ». 2021PAUU3063. Thèse de doct. Anglet, France : Université de Pau & des Pays de l'Adour (UPPA), 2021.
- [6] D. D'AMICO. « Système de traitement de données massives appliqué à la supervision de milieux côtiers ». 2021PAUU3038. Thèse de doct. 2021.
- [7] P.-A. PONCET. « Characterization of wave impact loading on structures at full scale : field experiment, statistical analysis and 3D advanced numerical modeling ». 2021PAUU3022. Thèse de doct. Anglet, France : Université de Pau & des Pays de l'Adour (UPPA), 2021.
- [8] C. LAVAYSSIERE. « Supervision et instrumentation à distance, libre et interopérable, du capteur à l'utilisateur. » 2022PAUU3041. Thèse de doct. 2022.

Conclusion générale

L'ensemble de mes activités illustre une cohérence forte entre mes compétences de recherche, d'enseignement et mes responsabilités institutionnelles. En recherche, mes travaux ont montré l'importance de la supervision logicielle et instrumentale, appliquée aussi bien au suivi d'ouvrages côtiers qu'à la gestion énergétique des bâtiments. La supervision constitue un fil directeur de mes contributions scientifiques, renforcé par l'encadrement et la co-direction de nombreuses thèses qui ont permis d'ouvrir de nouvelles perspectives méthodologiques et applicatives.

Sur le plan pédagogique, mon investissement dans l'enseignement de l'informatique industrielle a permis de développer des approches innovantes, en particulier à travers les laboratoires distants qui apportent également une cohérence avec mes activités de recherche. Ces dispositifs, pensés pour motiver et accompagner les étudiants, traduisent la volonté d'y intégrer outils numériques adaptés aux nouvelles générations d'étudiants.

Dans mes responsabilités de gestion de formation, notamment au sein des licences professionnelles dédiées au bâtiment et à la construction (Géo3D et Ingénierie des façades), j'ai pu ancrer ces approches dans des parcours professionnalisants. Ces formations, au croisement du numérique et du secteur de la construction, favorisent l'intégration des nouvelles technologies dans des domaines du BTP en pleine transition.

Enfin, mon mandat de vice-président en charge du patrimoine immobilier constitue un prolongement naturel de ces thématiques. La gestion et l'optimisation énergétiques des bâtiments, via des systèmes de supervision et de GTC intelligentes, sont en adéquation avec mes compétences en enseignement et en recherche.

Les différentes perspectives de mes activités de recherche concernent des applicatifs en génie côtier et en efficacité énergétique dans les bâtiments s'inscrivent pleinement dans les priorités de la transition écologique. Le choix d'un logiciel libre, tel que PyScada, participe aussi à cette démarche en favorisant la mutualisation des développements, en assurant leur pérennité, limitant ainsi l'obsolescence technologique tout en contribuant à un usage plus sobre et durable du numérique.

Ainsi, l'articulation entre recherche, pédagogie et responsabilités collectives met en lumière comment la supervision et le suivi intelligent des systèmes ne sont pas seulement des objets d'étude, mais également des leviers concrets pour accompagner les transformations énergétiques, technologiques et sociétales actuelles.

Troisième partie

**Autres activités académiques et
scientifiques**

Formation et diplômes

- 2008 **Doctorat en Systèmes Automatiques**, Thèse de Doctorat de l'université de Toulouse, France
- 2004 **Ingénieur Génie Industriel**, Spé. mécatronique, ENI Tarbes, France
- 2004 **Diplôme d'Études Approfondies (DEA) en Systèmes Automatiques**, Institut National Polytechnique, Toulouse

Expérience professionnelle recherche

- Depuis 2010 **Maitre de conférences - CNU61**, IUT de Bayonne - Dpt. Génie Industriel et Maintenance / Université de Pau et des Pays de l'Adour (UPPA)
Enseignement : Dpt. GIM IUT de Bayonne / Recherche : laboratoire SIAME EA 4581
- 2008-2009 **ATER**, Département Génie Industriel et Maintenance IUT de Bayonne, Université de Pau et des Pays de l'Adour
- 2007-2008 **ATER**, UFR Sciences, Université de Pau et des Pays de l'Adour
- 2004-2008 **Thèse de doctorat**, UFR Sciences, Université de Pau et des Pays de l'Adour, Observateurs de systèmes linéaires : application à la détection et localisation de fautes, Systèmes automatiques, INP Toulouse, LGP Tarbes
- 2003-2004 **DEA**, Institut National Polytechnique de Toulouse, Laboratoire Génie de production, Simulateur d'un canal par la méthode de collocation

Expérience et responsabilités pédagogiques

- 2024-2025 **Congés de recherche pour conversion thématique**, 6 mois pour le développement de nouvelles activités de recherche en lien avec la supervision de systèmes pluri-technologiques (PyScada)
- 2023-2024 **Chef de département adjoint**, IUT de Bayonne - Dpt. Génie Industriel et Maintenance / Université de Pau et des Pays de l'Adour
- 2022-2024 **Responsable parcours Licence Professionnelle Ingénierie des façades**, IUT de Bayonne - Dpt. Génie Industriel et Maintenance / Université de Pau et des Pays de l'Adour
- 2017-2024 **Responsable parcours Licence Professionnelle Geo3D. Création du parcours en 2017**, IUT de Bayonne - Dpt. Génie Industriel et Maintenance / Université de Pau et des Pays de l'Adour
- 2017-2024 **Directeur de la mention Licence professionnelle Bâtiment et construction**, IUT de Bayonne - Dpt. Génie Industriel et Maintenance / Lycée Cantau / Université de Pau et des Pays de l'Adour

2011-2021 **Directeur des études Licence Professionnelle Ecologie Industrielle, IUT de Bayonne - Dpt. Génie Industriel et Maintenance / Université de Pau et des Pays de l'Adour**

Responsabilités collectives et d'intérêt général

depuis 2025 **Vice-Président en charge du Patrimoine Immobilier, Logistique et Sécurité de l'UPPA, Université de Pau et des Pays de l'Adour**

depuis 2025 **Membre élu du conseil de laboratoire SIAME, Université de Pau et des Pays de l'Adour**

2020-2024 **Membre élu du conseil académique et du conseil de la recherche de l'UPPA, Université de Pau et des Pays de l'Adour**

Langues

Anglais Lu, parlé, écrit (597 au TOEFL)

Espagnol Lu, parlé, écrit

Compétences informatiques

Logiciels EEA LabVIEW, Matlab, Simulink / dSPACE, Orcad-Spice, TwidoSoft, MultiSim - Ultiboard

OS Linux / Unix, Windows

Programmation C, C++, Latex, Assembleur, SQL, Visual Basic, php/html, python

Autres

Association Membre du bureau de 2 associations depuis 2015

Engagement citoyen Conseiller municipal délégué à la commune de Bénesse-Maremne depuis 2020

Encadrement et co-encadrement d'étudiants

Sommaire

10.1 Résumé	145
10.2 Co-Direction et co-encadrement de thèse	146
10.3 Liste des directions et codirections de thèses	146

10.1 Résumé

Au fil des différentes collaborations et projets dans lesquels j'ai été impliqué j'ai **encadré des stagiaires de Master, co-dirigé et co-encadré des thèses ou post-doc** mais également **recruté un ingénieur d'études**. J'ai **co-dirigé trois thèses** avec un taux d'encadrement de 50% :

- 2019-2022 - Camille Lavayssière
- 2017-2021 - Dorian D'Amico
- 2015-2018 - Fawzi Khattar

En 2022-2013, j'ai pu encadrer l'**année de post-doc** de C. Lavayssière.

J'ai également **co-encadré deux autres thèses** :

- 2016-2021 - Nawal Eldrogi
- 2017-2021 - Pierre-Antoine Poncet

J'ai eu l'occasion de m'impliquer dans le suivi de stagiaires de BAC+2 à BAC+5 et également dans l'encadrement des projets tuteurés au département **GIM** de l'IUT de Bayonne :

- **Encadrements de projets tuteurés** pour les 2^{ème} année du DUT **GIM** et licence professionnelle Écologie industrielle (2 projets par an).
- **Encadrements de stages L2-L3** En plus du suivi régulier des alternants et stagiaires (8 par an en moyenne) des formations de mon département d'enseignement j'ai également commandité et financé des stages de 10 semaines (2 en BUT Informatique en 2022 et 1 en BUT **GIM** en 2020) ou des stages de 16 semaines (1 en licence professionnelle écologie industrielle en 2022).
- **Encadrements de stagiaires de M1-M2** L'encadrement des stages de M1 et M2 a contribué à préparer les sujets de thèse des doctorants que j'ai commencé à co-diriger à partir de 2017.
 - 2017 : M2 - 6 mois - Amira Rahali
 - 2016 : M2 - 6 mois - Frédéric Bertin
 - 2014 : M1 - 4 mois - Bogdan Belciu
 - 2013 : M2 - 6 mois - Irina Talmaciu

10.2 Co-Direction et co-encadrement de thèse

10.3 Liste des directions et codirections de thèses

Dans le cadre de mes activités de recherche j'ai co-dirigé 3 thèses avec un taux de 50% et co-encadré 2 thèses :

- **Co-direction : Camille Lavayssiere**
 - *Direction* : F. Luthon (LIUPPA) - 50% / Co-direction : B. Larroque (SIAME) - 50%
 - *Laboratoires* : LIUPPA - SIAME
 - débutée le 1/11/2019 - Soutenue le 8/12/2022
 - *Titre* : Supervision et instrumentation à distance, libre et interopérable, du capteur à l'utilisateur.
 - *Mots-clés* : SCADA, open source, automation.
 - *Les publications* : Voir la liste des publications en section 12. Au total, 9 publications : [2, 5, 15, 16, 25, 26, 27, 31, 35].
 - *Situation actuelle* : MCF à l'IUT de Bayonne.
- **Co-direction : Dorian D'Amico**
 - *Direction* : F. Luthon (LIUPPA) - 50% / Co-direction : B. Larroque (SIAME) - 50%
 - *Laboratoires* : LIUPPA - SIAME
 - débutée le 8/11/2017 - Soutenue le 15/04/2021
 - *Titre* : Système de traitement de données massives appliqué à la supervision de ressources aquatiques et de milieux côtiers.
 - *Mots-clés* : Apprentissage supervisé, apprentissage non-supervisé, apprentissage automatique Station de mesure, mesure in-situ, impact de vague.
 - *Les publications* : Voir la liste des publications en section 12. Au total, 4 publications : [1, 4, 7, 36].
 - *Situation actuelle* : Ingénieur en informatique.
- **Co-direction (UPV-LIUPPA) : Fawzi Khattar**
 - *Direction* : F. Luthon (LIUPPA) - 50% / F. Dornaika (UPV) / : B. Larroque (SIAME) - 50%
 - *Laboratoires* : LIUPPA & UPV
 - Débutée le 01/10/2015 - Soutenue le 13/12/2018
 - *Titre* : Enriching remote learning labs using computer vision and pattern recognition.
 - *Mots-clés* : Real-time image processing, remote laboratory, face analysis, student motivation.
 - *Les publications* : Voir la liste des publications en section 12. Au total, 5 publications : [3, 30, 33, 37 et 38].
 - *Situation actuelle* : Ingénieur en informatique.
- **Co-encadrement : Pierre-Antoine Poncet**
 - *Direction* : S. Abadie (SIAME) / Co-direction : B. Liquet / Co-encadrement : B. Larroque (SIAME)
 - *Laboratoires* : SIAME - LMAP
 - débutée le 01/10/2017 - Soutenue le 19/06/2021
 - *Titre* : Wave impact on structure : field experiment, statistical analysis and 3D advanced numerical modeling.
 - *Mots-clés* : Vague, impact, mesures in-situ, statistique, modélisation.
 - *Les publications* : Voir la liste des publications en section 12. Au total, 6 publications : [1, 4, 8, 17, 19, 34].
 - *Situation actuelle* : Ingénieur.

— **Co-encadrement : Nawal Eldrogi**

- *Direction* : F. Luthon (LIUPPA) / Co-encadrement : B. Larroque (SIAME)
- *Laboratoire* : LIUPPA
- débutée le 01/12/2016 - Soutenue le 16-06-2021
- *Titre* : Vision par ordinateur pour suivi automatique et caractérisation de comportement animal aquatique.
- *Mots-clés* : Vision par ordinateur, milieu aquatique, système d'information.
- *Les publications* : Voir la liste des publications en section [12](#). Au total, 5 publications : [6, 14, 18, 28, 32].
- *Situation actuelle* : Mère au foyer.

Tâches administratives, activités d'enseignement, expérience en entreprise

Sommaire

11.1 Tâches administratives, responsabilités collectives et d'intérêt général . .	149
11.1.1 Présentation synthétique des responsabilités	149
11.1.2 Responsabilités et mandats locaux	149
11.1.3 Autres	151
11.2 Activités d'enseignement et responsabilités pédagogiques	151
11.2.1 Investissement pédagogique	151
11.2.2 Responsabilités pédagogiques	155
11.3 Prestation / collaboration recherche & développement (R & D)	156

11.1 Tâches administratives, responsabilités collectives et d'intérêt général

11.1.1 Présentation synthétique des responsabilités

Au sein d'une composante telle que qu'un IUT, il est primordial de s'investir dans les tâches collectives contribuant au bon fonctionnement des formations. En sus des **responsabilités administratives directement liées à la formation** (directeur et responsable de 2 parcours de licence professionnelle, responsable de poursuite d'études, suivi de stages et d'alternances, chef de département adjoint, voir section 11.2.1), j'ai souhaité également contribuer à des responsabilités plus larges au sein de l'Université. Ainsi j'ai pu présenter ma candidature sur différents mandats sur le volet enseignement, le volet recherche mais également sur la vie collective.

11.1.2 Responsabilités et mandats locaux

Vice-président Patrimoine Immobilier de l'UPPA

Depuis le mois d'avril 2025, le président de l'Université Laurent Bordes a proposé ma candidature au conseil d'administration (CA) de l'UPPA pour le mandat 2025-2029. J'ai été élu par le CA de l'UPPA le 25 avril 2025. Mon rôle consiste à assister le président dans l'élaboration et le suivi de la stratégie patrimoniale immobilière de l'université. À ce titre, je

pilote, en lien avec la direction générale des services et le directeur général délégué au Patrimoine, à l'immobilier, à la logistique et à la sécurité (DGD PILS), les projets structurants en matière immobilière, de maintenance, de sécurité et de développement durable des campus.

De plus, le vice-président patrimoine immobilier oriente les missions suivantes en s'appuyant sur le DGD PILS qui a la responsabilité opérationnelle de la mise en œuvre des actions sur son périmètre :

1. Définition et pilotage de la stratégie patrimoine immobilier
 - Contribuer à la définition de la politique patrimoniale de l'établissement en cohérence avec la stratégie pluriannuelle (CPER, plan stratégique, COM, etc.).
 - Participer à l'élaboration et au suivi du schéma pluriannuel de stratégie immobilière (SPSI).
 - Assurer une articulation forte entre les enjeux patrimoniaux, académiques, environnementaux et financiers.
2. Suivi des opérations immobilières
 - Participer à la programmation, au pilotage et à la priorisation des opérations de construction, de réhabilitation et de mise en conformité.
 - Être l'interlocuteur politique de l'établissement auprès des partenaires institutionnels sur les dossiers immobiliers (ministère, collectivités, rectorat, CROUS, etc.).
 - Veiller à l'intégration des enjeux de transition écologique et de sobriété énergétique dans toutes les opérations.
3. Coordination avec les fonctions support liées au patrimoine immobilier
 - Travailler en lien étroit avec le pôle PILS et le chargé de mission transition environnementale.
 - Favoriser la mutualisation des espaces, l'optimisation des surfaces, et la rationalisation des usages.
 - Suivre les dossiers de maintenance, de sécurité des bâtiments, d'accessibilité et de sûreté.
4. Contribution aux instances de gouvernance
 - Représenter la présidence dans les instances internes et externes sur les sujets patrimoniaux, et auprès des autorités partenaires.
 - Présenter régulièrement l'état d'avancement des projets dans les instances.
 - Travailler en concertation avec les autres vice-présidences (formation, recherche, numérique, vie étudiante, etc.) pour assurer la cohérence des projets.
5. Participation à la dynamique de transition environnementale et du développement durable (portée par le chargé de mission transition environnementale)
 - Intégrer les enjeux de durabilité, de neutralité carbone et de résilience dans la gestion du patrimoine immobilier.
 - Contribuer à l'émergence de campus durables et inclusifs.

Membre élu au conseil du laboratoire SIAME

En 2024, j'ai été élu représentant des maîtres de conférences, au sein du conseil de laboratoire du SIAME. Ce mandat me permet de contribuer activement aux réflexions stratégiques et à la gouvernance scientifique du laboratoire.

Membre élu à la commission de la recherche et au conseil académique de l'UPPA 2020-2024

Entre 2020 et 2024, j'ai été élu au sein du **conseil académique** et de la **commission recherche**. J'ai participé la plupart du temps en visio-conférence aux conseils et aux commis-

sions : conseils académiques, conseils académiques restreints et commission de la recherche. Dans le cadre de ces missions j'ai été amené à expertiser certains dossiers afin d'émettre des avis pour l'obtention d'avancement ou de primes. J'ai également contribué à la relecture de dossiers destinés à répondre à des appels à projets. Cette expérience m'a permis de mieux comprendre certains mécanismes administratifs et a contribué à mon investissement dans la vie de mon établissement.

Membre élu du comité d'experts de l'UPPA pour les sections CNU 61 et 63

Depuis 2015, je suis membre élu du **comité d'experts de l'UPPA pour les sections CNU 61 et 63**. J'ai notamment participé aux recrutements des candidats aux postes d'ATER et de PAST pour l'Université.

Membre élu représentant des maîtres de conférences au CA de l'IUT de Bayonne 2015-2016

En 2015 et en 2016, j'ai été **élu représentant des maîtres de conférences** au conseil d'administration de l'IUT de Bayonne. La participation à plusieurs conseils d'administration a constitué une première expérience enrichissante.

11.1.3 Autres

Entre 2014 et 2020 j'ai été élu **président de l'association du personnel de l'IUT de Bayonne** nommée GASCUB. A ce titre j'ai participé à l'organisation de fêtes de pâques ou de Noël à destination des enfants du personnel mais également organisé 2 repas festifs par an à destination du personnel. L'organisation de ces événements a parfois pu servir de support à des projets tuteurés du département GEA de l'IUT.

11.2 Activités d'enseignement et responsabilités pédagogiques

11.2.1 Investissement pédagogique

Présentation synthétique de l'activité d'enseignement

Depuis mon recrutement en tant que Maître de Conférences en 2010, je réalise des heures d'enseignement au-delà de mon service statutaire de 192h eq. TD (voir tableau 11.1). En effet, le sous-encadrement au sein de mon département de formation conduit les titulaires à recruter des vacataires ou à assumer de fortes charges horaires. Le recrutement et la formation des vacataires sur les systèmes technologiques que j'utilise au département **GIM** est assez chronophage sans pouvoir garantir la pérennité des vacataires que je forme. Ainsi, j'ai dû limiter le nombre de vacataires qui interviennent dans les modules de formation sous ma responsabilité. Cependant comme le montre le graphique de la figure 11.2, j'ai considérablement réduit ma charge d'enseignement sur les 4 dernières années.

Lors de l'année universitaire 2024-2025, j'ai demandé un semestre Congés Recherche de conversion Thématique (CRCT) qui m'a été accordé par le CNU. Au cours de cette année, j'ai pu explorer de nouvelles perspectives sur mes activités de recherche qui ont été présentées dans le chapitre 7.

Mes thématiques d'enseignement sont centrées sur le **domaine de l'informatique industrielle**, l'électronique numérique et la supervision. Malgré ma charge conséquente au **niveau**

Année	L1	L2	L3	M2	CM	TD	TP	Total en héqTD
2017-2018	82	219,75	93	46	33	169	238,75	378
2018-2019	67	208,5	113	47	29	158	248,5	367
2019-2020	81	176	64	53,5	24,5	162,5	187,5	324
2020-2021	51	207,75	94	42	33	148	213,75	340
2021-2022	75	155,75	64	42	17	130	189,75	282
2022-2023	91	108	69	15	15,5	72,5	195	247
2023-2024	27,5	97	107,5	15	31,5	92,5	123	221
2024-2025 - CRCT	0	27,25	40	15	29,5	16,75	54	96
Moyenne	60	153	81	35	27	119	185	281

TABLE 11.1 – Répartition des heures d’enseignements sur les 7 dernières années.

L (BUT [GIM](#)) j’ai souhaité également intervenir au **niveau M** afin d’élargir mes compétences et d’approfondir certains aspects scientifiques notamment en supervision. J’ai pu dispenser des cours magistraux (CM), des travaux dirigés (TD), des travaux pratiques (TP), du suivi de projets tuteurés et de stages. Ces missions d’enseignements m’ont amené à intervenir auprès d’étudiants en **formation initiale** ou en **formation par alternance**.

En début de carrière je me suis grandement investi sur la partie enseignement en créant de nouveaux supports ou de nouveaux modules intégralement. Depuis quelques années les veilles technologiques effectuées lors du suivi des stagiaires / alternants ou lors de mes activités de recherche me conduisent à mettre régulièrement à jour les supports de cours initialement construits.

Je suis également **responsable de plusieurs modules de formation au BUT [GIM](#) et responsable de 2 parcours de licence professionnelle**. J’ai également participé activement au **montage de la licence professionnelle Écologie Industrielle** et monté intégralement la licence professionnelle Géo 3D.

Je participe chaque année à des **salons d’information** à destination des lycéens et participe à l’organisation des **journées portes ouvertes de l’IUT**.

De plus, j’ai pu développer des modules de travaux pratiques réalisables à distance (**Projet LaboRem**) afin de fournir à distance un accès aux laboratoires de travaux pratiques de l’IUT. Le tableau [11.1](#) permet d’avoir une vue synthétique quantifiée sur mes activités d’enseignement. Les graphiques de la figure [11.1](#) permettent de visualiser les répartitions de ces enseignements par type et par niveau. Le graphique de la figure [11.2](#) illustre l’évolution du total de mes heures d’enseignement.

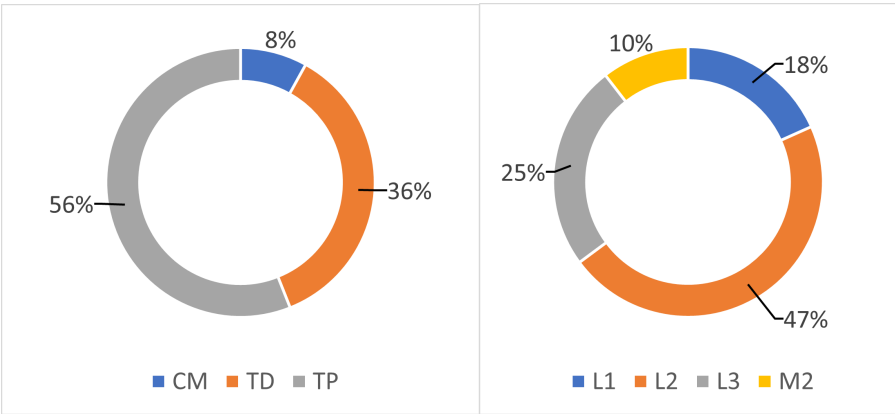


FIGURE 11.1 – Répartition de mes enseignements : par type / par niveau

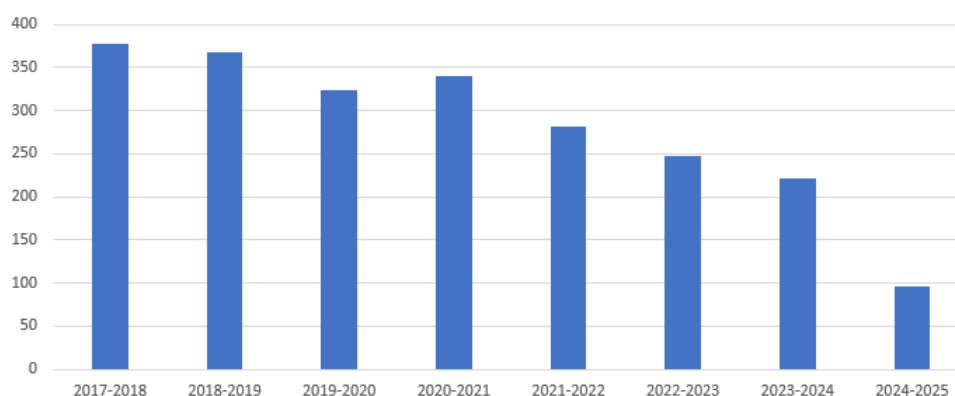


FIGURE 11.2 – Charge horaire de mes enseignements par année.

Présentation des enseignements

Depuis ma deuxième année de doctorat en 2005 j'ai dispensé des cours dans différents établissements :

- **2005-2007 : ENI de Tarbes - INPT.** Les cours dispensés à l'ENIT concernaient :
 - l'initiation des étudiants à **l'informatique industrielle** plus particulièrement sur le contrôle de systèmes automatisés en utilisant **le GRAFCET et le GEMMA**. La conception des GRAFCET et GEMMA servent à implémenter des programmes dans des automates programmables industriels afin de piloter des machines plus ou moins complexes. Une fois les programmes saisis dans les API mon travail consistait à aider les étudiants à mettre au point leur programme en fonction des effets constatés sur les systèmes technologiques contrôlés par l'automate. Ces cours étaient à destination des **élèves de première et deuxième année (BAC+1 et BAC+2)**. Les supports de CM, TD et TP m'ont été fournis par un professeur agrégé de l'école.
 - des cours et travaux pratiques d'**électronique analogique** pour enseigner l'électricité et les théorèmes fondamentaux en électricité. Les séances de travaux pratiques consistaient à prendre en main les différents appareils d'une paillasse de TP en électronique à savoir l'oscilloscope, le multimètre et le générateur de fonctions, afin de vérifier les différentes notions théoriques abordées en cours. Bien qu'étant en deuxième année de doctorat à cette époque j'ai souhaité **concevoir intégralement les supports de cours** avec l'aide et les conseils d'un professeur agrégé en génie électrique.
- **2007-2008 : UFR Sciences Pau - UPPA.** Lors de ma première année d'ATER des TD et TP d'**électronique analogique** m'ont été confiés au sein de l'UFR Sciences et à destination des L2 Sciences Physiques et L3 Physique. Ces TP permettaient de vérifier les lois fondamentales de l'électronique analogique. Les composants actifs de type amplificateurs opérationnels étaient également à étudier lors de ces travaux pratiques.
- **depuis 2008 : IUT de Bayonne / Dpt. GIM - UPPA**
 - **DUT / BUT GIM :** Lors de mon arrivée à l'IUT de Bayonne, pour ma deuxième année d'ATER, le département **GIM** venait d'ouvrir l'année précédente. L'équipe pédagogique n'était pas encore totalement constituée ce qui m'a permis de m'investir pleinement pour le **montage de cours et de travaux pratiques**. Bénéficiant d'une enveloppe financière pour le montage des salles de travaux pratiques, primordiales dans cette formation, le défi a été très intéressant à relever. Comme dans tous les BUT l'ensemble du programme pédagogique est précisément cadré par un programme national mis à jour environ tous les 4 ans. Afin d'effectuer

les meilleurs choix pour le département j'ai trouvé intéressant de **bénéficier du retour d'expérience de certains départements GIM déjà existants** dans d'autres IUT en France. Ainsi j'ai pu aller rencontrer des collègues du département de GIM de l'IUT de Blagnac et des collègues du département GIM de l'IUT de Lorient. Ces rencontres ont été très enrichissantes et m'ont permis d'effectuer des choix éclairés pour notre département GIM de Bayonne.

Ainsi je suis devenu **responsable du pôle d'informatique industrielle / supervision du département GIM de l'IUT de Bayonne** et j'ai grandement contribué à la mise en place de l'ensemble des systèmes technologiques sur deux salles de TP. Les enseignements (CM, TD et TP) concernent **les automatismes industriels, la chaîne d'acquisition de mesures et la supervision logicielle** des process industriels.

— **Licence professionnelle Géo3D**

En 2017, j'ai créé et pris la responsabilité de la licence professionnelle bâtiment et construction parcours Géo3D (voir section 11.2.2) en collaboration avec le lycée Cantau. J'ai également pris la **responsabilité de l'UE d'enseignement général** et j'interviens dans le **module d'informatique** où j'ai monté un cours d'imagerie numérique. Je m'occupe également du suivi des projets de fin d'études et j'assiste à l'ensemble des soutenances des projets de fin d'études.

— **Licence professionnelle écologie industrielle**

En 2011, j'ai assuré la **responsabilité de l'UE Supervision** de la licence professionnelle écologie industrielle. J'ai conçu une séquence complète de travaux pratiques en souhaitant fournir aux étudiants des systèmes réels à étudier. J'ai alors eu l'idée d'**équiper le bâtiment de l'IUT avec des capteurs dialoguant à l'aide de protocoles de communication industriels**. Ce système connecté en continu fournit des données réelles sur les **consommations énergétiques** du bâtiment de l'IUT de Bayonne. La séquence de cours commence par une visite des installations techniques du bâtiment et se termine par la création d'une application logicielle permettant d'afficher en temps réel les différentes consommations énergétiques (sectorisées ou par usage). **Le retour des étudiants est très positif sur cette séquence pédagogique.**

J'ai également eu l'opportunité d'effectuer des enseignements au niveau M :

— **depuis 2016 : ISABTP 5^{ème} année**

Avec le retour d'expérience du module concernant le suivi énergétique du bâtiment, j'ai proposé à l'ISABTP, école d'ingénieurs en bâtiment et travaux publics localisée sur le même campus que l'IUT, d'intervenir auprès des étudiants de cinquième année de l'école ayant choisi la spécialité Habitat et Énergie. En complémentarité avec Eva Girret, professeur agrégée à l'ISABTP, nous faisons travailler les étudiants sur différents usages énergétiques du bâtiment (traitement de l'air, salle serveur, chaufferie,...) mais également sur **des maquettes de logiciels type GTC/GTB** (Gestion Technique Centralisée / Gestion Technique du Bâtiment).

— **2017-2022 : MASTER 2 Eco-Ingénierie - UPPA**

Ce cours exploite également les différents capteurs positionnés pour du suivi énergétique dans le bâtiment de l'IUT. Les étudiants doivent proposer une **maquette logicielle pour le suivi énergétique** du bâtiment de l'IUT puis développer une **application logicielle afin de la rendre fonctionnelle**. L'archivage en base de données des informations collectées fait également partie du cahier des charges du projet que je propose aux étudiants. Soucieux de réduire ma charge d'enseignement en 2022-2023 j'ai dû malheureusement renoncer à ces enseignements.

11.2.2 Responsabilités pédagogiques

Depuis 2010 au sein du département **GIM** de l'IUT de Bayonne je me suis impliqué dans différentes responsabilités pédagogiques. Voici la liste des responsabilités que j'ai pu assurer au sein de mon département :

- **2023-2024 : Chef de département adjoint au département **GIM** de l'IUT de Bayonne.** Suite aux actions liées au mouvement du collectif 384 plusieurs PRAG de mon département (4 sur 5) ont démissionné de leurs tâches administratives. N'étant que 2 enseignants chercheurs dans le département dont un est actuellement directeur de l'IUT de Bayonne j'ai été contraint d'assurer une tâche administrative supplémentaire pour le bon déroulement de l'année universitaire 2023-2024. Je m'occupais de la planification des 3 années de formation du BUT, je participais aux réunions de bureau et intervenais régulièrement dans des prises de décisions pour la gestion de la vie du département.
- **depuis 2022 : Responsable du parcours ingénierie des façades de la LP bâtiment et construction.** Afin de pallier le manque de titulaire pouvant assurer cette fonction j'ai accepté de prendre la **responsabilité de ce parcours**. Je gère la partie administrative en essayant de mutualiser au maximum la charge de travail requise avec celle du parcours Géo 3D.
- **depuis 2017 (création) : Responsable du parcours Géo3D de la LP Bâtiment et construction.** Sollicité par le lycée Cantau pour l'ouverture de ce parcours j'ai pris la responsabilité de prendre en charge l'**intégralité du dossier de montage de cette formation** (documents administratifs, création du programme pédagogique, élaboration de la matrice des compétences, réalisation des fiches syllabus) permettant l'ouverture de ce nouveau parcours. Chaque année j'organise les conseils de perfectionnement, les jurys de fin de semestre, le jury de recrutement et les soutenances de projets de fin d'études. Plébiscité par les étudiants et par les entreprises depuis son ouverture, ce parcours accueille chaque année 18 étudiants en contrat d'apprentissage. J'interviens également dans un des modules de cette formation.



FIGURE 11.3 – Couverture des plaquettes des 2 licences professionnelles créées ou co-crées.

En parallèle de ces responsabilités j'ai pris en charge d'**autres responsabilités pédagogiques** :

- **en 2010-2011** : J'ai participé au montage de la licence professionnelle écologie industrielle en collaboration avec mon collègue le professeur Franck Luthon. Ainsi j'ai pu

comprendre les rouages du montage d'une formation en travaillant sur l'ensemble des documents nécessaires à son accréditation. J'ai également contribué au recrutement des vacataires et au montage intégral de certaines séquences de cours.

- **depuis 2010** : Je suis responsable de la poursuite d'études au département **GIM**. Une grande majorité de nos étudiants au département **GIM** poursuivent les études. Mon rôle est de les conseiller et de leur permettre d'avoir le maximum d'informations pour éclairer leur orientation. Dans cet objectif, j'ai mené des enquêtes sur les poursuites d'études plébiscitées par les premières promotions et j'ai organisé entre le semestre 5 et le semestre 6 des **présentations de ces écoles ou formations** en salle de TD dans les locaux de l'IUT. Chaque année, 5 formations sont présentées aux étudiants du département **GIM**.

Mon rôle consiste également à organiser le jury de poursuite d'études pour attribuer aux étudiants leur **avis de poursuite d'études** et remplir les fiches de poursuite d'études demandées par les formations. Je propose aux étudiants qui le souhaitent des **entretiens individualisés** pour les guider en prenant connaissance de leur projet personnel et professionnel. Je rédige chaque année des **lettres de recommandation** aux étudiants ayant obtenu un avis très favorable.

- **de 2010 à 2014** : *Responsable de la communication au département **GIM***. J'avais en charge l'édition des plaquettes, la réalisation graphique des posters, des kakemonos ainsi que la mise à jour du site web. J'ai également contribué aux opérations liées aux journées portes ouvertes ainsi qu'aux journées d'immersion des lycéens. J'ai également diffusé des actualités au sujet des actions du département **GIM** de Bayonne sur le site web de notre institut.
- **Depuis 2010** : *Responsable d'une salle de TP et co-responsable du plateau EEA de l'IUT de Bayonne*. En collaboration avec les ESAS et l'ingénieur d'études du département, je contribue à maintenir le plateau EEA de l'IUT. Cela consiste à réaliser des opérations de maintenance, à gérer les stocks des différents consommables utilisés en travaux pratiques et à effectuer du rangement.

11.3 Prestation / collaboration recherche & développement (R & D)

Les compétences développées en supervision et en instrumentation m'ont donné l'opportunité de travailler avec des entreprises, des collectivités territoriales ou des établissements publics. Ces activités de R& D sont résumées ci-après :

- **2017-2018 - Curistec**

En 2017, j'ai été sollicité par l'entreprise **Curistec** basée à Pau. Curistec est une entreprise technologique indépendante, qui aide ses clients à mieux produire les énergies de la terre en développant des solutions technologiques transverses innovantes axées sur l'augmentation de l'efficacité, la réduction des coûts et la protection de l'environnement. Pendant 2 années j'ai effectué des **missions afin d'automatiser une cellule triaxiale** permettant d'effectuer des essais sur des échantillons de roches provenant de forages. Au total, les coûts des **contrats de prestation recherche effectués ont été de 30 000 € et se sont déroulées sur une durée cumulée de 10 mois**.

- **2023-2024 - Inviséo / MACS**

En 2023, un contrat de collaboration recherche tri-partite avec la communauté des communes du sud des Landes (MACS) et la start-up Inviséo basée à Saint-Geours de Maremne dans les Landes a été établi. Ma contribution consiste à **déployer sur**

plusieurs bâtiments de la communauté de communes un système technologique permettant d'effectuer un suivi détaillé des consommations énergétiques. Le montant global est de 35 000 € (dont 15 000€ pour l'[UPPA](#) et 20 000€ pour inviseo) pour une durée de 10 mois.

— **2024 - BRGM**

En 2024, je suis intervenu auprès du BRGM (Bureau de Recherches Géologiques et Minières) afin d'installer une station de mesures d'impact des vagues sur la falaise de Bonifaccio en Corse. Suite aux travaux réalisés sur la digue de l'Artha, présentés à la section [5](#), le BRGM m'a sollicité pour mettre en place une instrumentation similaire sur une falaise. Le montant global est de 4 900€ pour une durée de 2 semaines.

Sommaire

12.1 Articles dans revues internationales à comité de lecture (13)	159
12.2 Actes publiés de conférences internationales, congrès et colloques à comité de lecture (17)	160
12.3 Articles dans conférences nationales (13)	162

L'ensemble des mes publications sont listées dans ce chapitre. La figure 12.1 permet d'en visualiser la répartition par année.

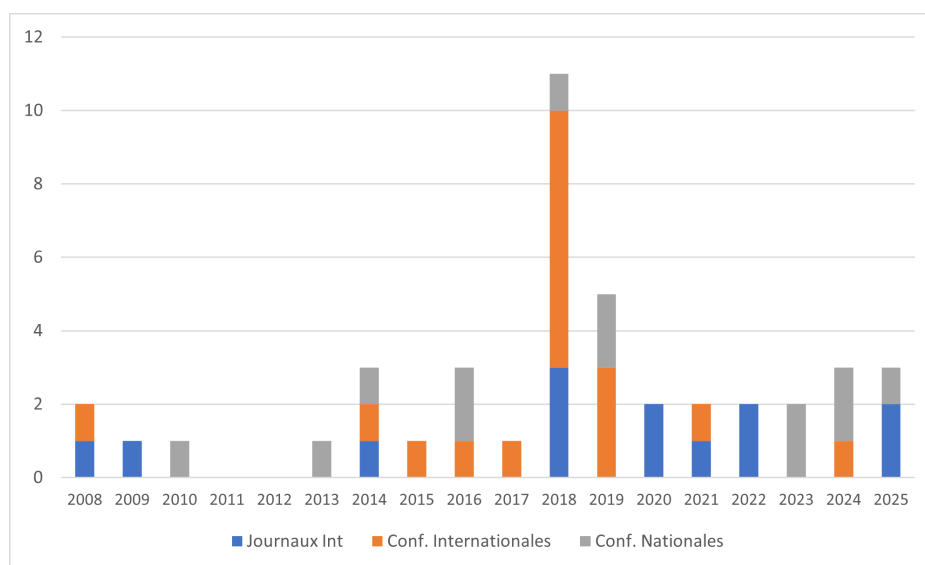


FIGURE 12.1 – Visualisation graphique du nombre de publication par type et par année

12.1 Articles dans revues internationales à comité de lecture (13)

1. E. Imbertie, D. Morichon, M. Delpey, **B. Larroque**, C. Lavayssière, Field study of post-overtopping flow impacts on a vertical wall at the crest of an upper-beach dike, Applied Ocean Research, Volume 163, ISN 0141-1187, 2025. [JCR Q2](#)
2. M. Bjaoui, **B. Larroque**, R. Djebali, L. Khemissi, R. Ruscassie, R. Benadli, F. Luthon, A. Sellami. Three-Phase PV Pumping System With Advanced Control for Enhanced

- Efficiency and Robustness : Modeling, Experimental Validation, and Optimization, Int. j. circuit theory appl. - International Journal of Circuit Theory and Applications (ISSN : 0098-9886, ISSN électronique : 1097-007X), 2025. [JCR Q3](#)
3. P.-A. Poncet, B. Liquet, **B. Larroque**, D. d'Amico, D. Sous, et al.. In-situ measurements of energetic depth-limited wave loading. *Applied Ocean Research*, 2022, 125, pp.103216. (10.1016/j.apor.2022.103216) (hal-03689145) [JCR Q2](#)
 4. C. Lavayssière, **B. Larroque**, F. Luthon. Laborem Box : A scalable and open source platform to design remote lab experiments in electronics. *HardwareX*, 2022, 11, pp.1-25. (10.1016/j.ohx.2022.e00301). (hal-03658332) [JCR Q2](#)
 5. F. Khattar, F. Luthon, **B. Larroque**, F. Dornaika. Visual localization and servoing for drone use in indoor remote laboratory environment. *Machine Vision and Applications*, 2021, 32 (1), pp.32. (10.1007/s00138-020-01161-7). (hal-03126470) [JCR Q3](#)
 6. D. d'Amico, **B. Larroque**, F. Luthon, P.-A. Poncet, S. Abadie. Continuous measurement and automatic processing of in-situ wave impact pressure data. *Journal of Coastal Research*, 2020, pp 214-219. (hal-02571020) [JCR Q4](#)
 7. Bastien Letowski, C. Lavayssière, **B. Larroque**, Martin Schröder, F. Luthon. A Fully Open Source Remote Laboratory for Practical Learning. *Electronics*, 2020, 9 (11), pp.1832. (10.3390/electronics9111832). (hal-03126482) [JCR Q3](#)
 8. N. Eldrogi, F. Luthon, **B. Larroque**, S. Alqaddafi, V. Bolliet. Motion estimation of glass eels by differential methods. *International Science and Technology Journal*, 2018, pp.299 - 315. (hal-01882199) Non indexé JCR
 9. F. Luthon, D. d'Amico, **B. Larroque**. Embedded Sensors in Coastal Structures for On-Site Wave Impact Pressure Monitoring. *IEEE Access*, 2018, 6, pp.56135-56141. (10.1109 / ACCESS.2018.2868702). (hal-01906794) [JCR Q2](#)
 10. **B. Larroque**, P. Arnould, F. Luthon, P.-A. Poncet, A. Rahali, et al.. In-situ measurements of wave impact pressure on a composite breakwater : preliminary results. *Journal of Coastal Research*, 2018, 85, pp.1 - 5. (10.2112/SI85-001.1).((hal-01809649) [JCR Q4](#)
 11. F. Luthon, **B. Larroque**. LaboREM : A Remote Laboratory for Game-Like Training in Electronics. *IEEE Transactions on Learning Technologies*, 2014, pp.1 - 13. (10.1109 / TLT.2014.2386337). (hal-01103190) [JCR Q1](#)
 12. F. Noureddine, **B. Larroque**, F. Rotella. Fault tolerance in robotics. *International Journal of Mechatronics and Manufacturing Systems*, 2009, 2 (3), pp.294-310. (10.1504/IJMMS.2009.026045). (hal-02135753) Non indexé JCR
 13. **B. Larroque**, F. Noureddine, F. Rotella. Towards a complete design of linear functional observers. *International Review of Automatic Control (IREACO)*, 2008, 1 (2), pp.132-142. (hal-02880892) Non indexé JCR

12.2 Actes publiés de conférences internationales, congrès et colloques à comité de lecture (17)

14. E. Imbertie, D. Morichon, M. Delpey, **B. Larroque**, C. Lavayssière. Field measurement of impact pressures on a vertical structure generated by overtopping waves on a shallow foreshore. 38th International Conference on Coastal Engineering, Sept. 2024, Roma, Italia. *Coastal Engineering Proceedings*, 38, structures.98.

15. C. Lavayssière, **B. Larroque**, F. Luthon. Analysis of student's behavior regarding the use of open source remote laboratories. 13th annual International Conference on Education and New Learning Technologies (EDULEARN21), Jul 2021, Mallorca (virtual), Spain. (hal-03230065)
16. B. Letowski, C. Lavayssière, **B. Larroque**, F. Luthon. An open source remote laboratory network based on a ready to use solution : Laborem. 12th Int. Conf. of Education, Research and Innovation (ICERI 2019), Nov 2019, Seville, Spain. pp.5726-5731. (hal-02463754)
17. N. Eldrogi, **B. Larroque**, V. Bolliet, F. Luthon. Computer vision for automatic detection and tracking of glass-eels. 17e journées ORASIS, May 2019, St-Dié des Vosges, France. (hal-02192232)
18. S. Abadie, L-E. Dumergue, **B. Larroque**. Simulation and measurements of flip-through impacts in wet dam breaking. Multiphase 2019, Oct 2019, Benguerir, Morocco. (hal-02398263)
19. F. Khattar, F. Dornaika, **B. Larroque**, F. Luthon. 3D Object-Camera and 3D Face-Camera Pose Estimation for Quadcopter Control : Application to Remote Labs. Advanced Concepts for Intelligent Vision Systems 19th International Conference, ACIVS 2018, Poitiers, France, September 24–27, 2018, Proceedings, 11182, pp.99-111, 2018, Lecture Notes in Computer Science, (10.1007 / 978-3-030-01449-0-9). (hal-02192546)
20. C. Lavayssière, B. Letowski, **B. Larroque**, F. Luthon. Easy Applied Sciences Learning through Open Source Remote Laboratory. 11th Annual Int. Conf. Education, Research and Innovation (ICERI2018), Nov 2018, Seville, Spain. (hal-01910013)
21. N. Eldrogi, F. Luthon, **B. Larroque**, S. Alqaddafi, V. Bolliet. Motion Estimation of Elver by Lucas and Kanade Optical Flow. 2nd Annual Conf. on Theories and Applications of Basic and Bio-Sciences, Misurata University, Libya, 1th Sep. 2018.
22. F. Khattar, F. Dornaika, F. Luthon, **B. Larroque**. Quadcopter Control Using Onboard Monocular Camera for Enriching Remote Laboratory Facilities. 21th IEEE International Conference on Automation, Quality and Testing, Robotics(AQTR 2018), May 2018, Cluj-Napoca, Romania. (hal-01809646)
23. P.-A. Poncet, S. Abadie, **B. Larroque**, B. Liquet, D. Sous. In-Situ Measurement of Wave Impact Pressure on a Composite Breakwater in St-Jean-de-Luz. XVIth International Symposium on Oceanography of the Bay of Biscay (ISOBAY 16), 2018, anglet, France. (hal-02154255)
24. C. Lavayssière, B. Letowski, **B. Larroque**, F. Luthon. LaboREM - A Network of Open Source Remote Laboratories for Learning. 405th International Academic Conference on Engineering, Technology and Innovations (IACETI 2018), Jul 2018, Santiago, Chile. pp.1-5. (hal-01910011)
25. F. Luthon, D. d'Amico, **B. Larroque**. Embedded sensors on coastal structures for in-situ wave impact pressure monitoring. 405th Int. Academic Conf. on Engineering, Technology and Innovations (IACETI 2018), Santiago, Chile, 16-17th Jul. 2018.
26. F. Luthon, **B. Larroque**, F. Khattar, F. Dornaika. USE OF GAMING AND COMPUTER VISION TO DRIVE STUDENT MOTIVATION IN REMOTE LEARNING LAB ACTIVITIES. ICERI 2017 : 10th annual International Conference of Education, Research and Innovation, Nov 2017, Seville, Spain. (hal-01653800)
27. F. Khattar, F. Luthon, **B. Larroque**, F. Dornaika. USING COMPUTER VISION FOR STUDENT-CENTRED REMOTE LAB IN ELECTRONICS. 8th International Conference on Education and New Learning Technologies, Jul 2016, Barcelona, Spain. pp.614-623. (hal-01343340)

28. F. Luthon, **B. Larroque**. REAL LABWORKS IN ELECTRONICS : YES! ... BUT REMOTELY CONTROLLED. Chova L.G, Martinez A. L., Torres I. C. ICERI 2015 : 8th International Conference of Education, Research and Innovation, IATED Int Academy of Technology, Education and Development, pp.8490-8500, 2015, 978-84-608-2657-6. (hal-01280476)
29. F. Luthon, **B. Larroque**. Remote Laboratory for Game-Based Distance Learning in Electronics. 4th Int. Conference on Electronics, Communications and Networks (CEC-Net 2014), Dec 2014, Beijing, China. (hal-01103183)
30. **B. Larroque**, F. Nouredine, F. Rotella. New residual generation design for fault detection. Proceedings of the 17th World Congress The International Federation of Automatic Control, 2008, Seoul, Korea.

12.3 Articles dans conférences nationales (13)

26. C. Lavayssière, **B. Larroque**, F. Luthon. Logiciel libre pour le suivi énergétique de bâtiment. Congrès National de la Recherche des IUT (CNRIUT'2025), Bayonne, 26 et 27 mars 2025.
27. M. Bjaoui, **B. Larroque**, F. Luthon. Conception et validation d'un algorithme de contrôle embarqué dédié pour une application automobile. Congrès National de la Recherche des IUT (CNRIUT'2024), Mulhouse, 27 et 28 mars 2024.
28. M. Bjaoui, **B. Larroque**, F. Luthon. Gestion de l'énergie et contrôle par mode glissant d'ordre supérieure d'un micro-réseau connecté au réseau électrique implanté au site de l'IUT de Bayonne et des pays de Basque. Congrès National de la Recherche des IUT (CNRIUT'2024), Mulhouse, 27 et 28 mars 2024.
29. F. Luthon, N. Eldrogi, **B. Larroque**. Estimation de mouvement de civelles par méthodes différentielles. Congrès National de la Recherche des IUT (CNRIUT'2023), St-Pierre de la Réunion, 7-9 Juin 2023.
30. **B. Larroque**, C. Lavayssière, F. Luthon. PyScada : Logiciel de supervision libre et générique. Congrès National de la Recherche des IUT (CNRIUT'2023), St-Pierre de la Réunion, 7-9 Juin 2023.
31. E. Imbertie, D. Morichon, **B. Larroque**, M. Delpey, B. Hernanz, C. Lavayssière. Autonomous measuring system of overtopping wave impact pressure in real field conditions. XVIIèmes Journées Nationales Génie Côtier – Génie Civil Chatou, 2022.
32. P.-A. Poncet, S. Abadie, **B. Larroque**, B. Liquet, D. Sous. Mesures in-situ d'impacts de vagues sur une digue composite In-situ measurements of wave impacts on a composite breakwater. Digues 2019 3ème Colloque sur les digues maritimes et fluviales de protection contre les inondation, Mar 2019, Aix-en-provence, France. (hal-02082354)
33. P.-A. Poncet, S. Abadie, **B. Larroque**, D. Sous, B. Liquet. Mesures in situ des impacts de vagues sur une digue composite : résultats préliminaires. XVèmes Journées Nationales Génie Côtier - Génie Civil La Rochelle, 29 au 31 mai 2018, May 2018, La Rochelle, France. pp.391-400, (10.5150/jngcgc.2018.044). (hal-02146169)
34. JC. Aymes, F. Bertin, **B. Larroque**, F. Luthon, E. Bouix, A. Bardonnnet, J. Rives, C. Bouchard, C. Tentelier. Accélérométrie et comportement reproducteur des poissons : utilisation de capteurs embarqués pour la détection des "bulls" chez la grande alose. 14èmes Journées de la Mesure et de la Métrologie (J2M2016), INRA, Blois, 10-13 Octobre 2016

35. **B. Larroque**, F. Luthon. LaboREM : De vrais TP d'électronique... Oui mais à distance. CONGRES NATIONAL DE LA RECHERCHE DES IUT, Jun 2016, Nantes, France. (hal-01332258)
36. **B. Larroque**, F. Luthon. LaboREM : travaux pratiques d'électronique à distance. EI-DOS64, le forum des pratiques numériques pour l'éducation, Mourenx, France, 15 Jan. 2014
37. **B. Larroque**, F. Luthon. LaboREM : retour sur 4 années d'expérimentation. Journées IUTICE Edition 2013, IUT Bayonne, 27 Sept. 2013
38. A. Petre, F. Luthon, **B. Larroque**, P. Dibon, J.-M. Fiton. LaboREM : laboratoire flexible pour instrumentation déportée et travaux pratiques à distance. 7e REAL Rencontre Europe Amérique Latine, Nov 2010, Cartagène des Indes, Colombie. pp.1-8. (hal-00786515)

- ARK** ARK est un schéma d'identifiants pérennes (Persistent Identifier) très utilisé dans les bibliothèques, archives ou institutions scientifiques.. [134](#)
- BACnet** *Building Automation and Control networks* en anglais, protocole de communication normalisé (ISO 16484-5) utilisé dans l'automatisation des bâtiments pour permettre l'interopérabilité entre équipements de différents fabricants, tels que les systèmes de chauffage, ventilation, climatisation, éclairage, sécurité et contrôle d'accès. [39](#), [107](#)
- CMU** *Central Measurement Unit* en anglais, unité de mesure centrale qui regroupe, le **CRIO**, les capteurs et le Raspberry Pi. [76](#), [77](#)
- CRIO** *Crio* pour CompactRIO, contrôleur industriel reconfigurable développé par NI (National Instruments), combinant un processeur temps réel, un FPGA et des modules d'E/S pour le contrôle, l'acquisition de données et l'automatisation dans des environnements exigeants. [74](#), [75](#), [76](#), [165](#)
- CVC** Chauffage, Ventilation et Climatisation : désigne l'ensemble des équipements et systèmes assurant le confort thermique et la qualité de l'air intérieur dans un bâtiment. [117](#), [132](#)
- Django** framework web open source écrit en Python, conçu pour faciliter et accélérer le développement d'applications web robustes, sécurisées et évolutives. Il suit le modèle architectural **MVT**, offre une interface d'administration automatique, une gestion simplifiée des bases de données, ainsi que de nombreux outils intégrés pour la gestion des utilisateurs, la sécurité, les formulaires.... [106](#), [107](#), [109](#), [110](#)
- DLF** Détection et localisation de fautes. [3](#), [15](#), [16](#)
- DUT** Dispositif sous test, *device under test* en anglais.. [38](#), [39](#)
- FAIR** Les principes FAIR désignent un cadre visant à rendre les données de recherche Faciles à trouver, Accessibles, Interopérables et Réutilisables, pour en faciliter le partage et la valorisation scientifique.. [5](#), [99](#), [101](#), [102](#), [103](#), [134](#)
- GIM** Département génie industriel et maintenance . [25](#), [27](#), [28](#), [30](#), [145](#), [151](#), [152](#), [153](#), [154](#), [155](#), [156](#)
- GPIO** *General Purpose Input/Output* en anglais, désigne des broches polyvalentes d'un microcontrôleur ou d'un microprocesseur qui peuvent être configurées en entrée ou en sortie pour lire des signaux ou piloter des composants externes . [39](#), [40](#), [107](#)

- GPS** *Global Positioning System* en anglais, système de géolocalisation par satellite . [48](#)
- HTML** *HyperText Markup Language* en anglais, est le langage de balisage standard utilisé pour structurer et présenter le contenu des pages web sur Internet. [32](#), [102](#), [106](#), [107](#)
- I2C-SMBus** protocole de communication série développé par Philips, permettant à plusieurs circuits intégrés de communiquer entre eux via seulement deux lignes : une pour l'horloge (SCL) et une pour les données (SDA). . [39](#), [107](#)
- IA** Intelligence artificielle. [14](#), [117](#), [132](#), [133](#)
- IVS** Équipe Interaction Vague Structure du laboratoire SIAME . [14](#), [25](#), [71](#), [123](#), [124](#), [128](#), [129](#), [166](#)
- KDD** *Knowledge Discovery in Databases* en anglais, processus d'extraction de connaissances utiles et compréhensibles à partir de grandes bases de données. [83](#), [84](#)
- KOSTARISK** laboratoire commun transfrontalier de recherche appliquée à l'observation et à la modélisation pour l'aide à la gestion des risques côtiers. Il associe l'équipe [IVS](#) du laboratoire [SIAME](#), le centre technologique espagnol AZTI et le centre de surveillance et de prévision Rivages Pro Tech (RPT) du groupe SUEZ. [116](#), [167](#)
- Laborem** laboratoire distant en électronique, développé depuis plusieurs années à l'IUT de Bayonne, qui permet aux étudiants d'effectuer des TP à distance avec du matériel réel via Internet. Il repose sur une technologie open-source évolutive pour des usages pédagogiques et de recherche. [3](#), [27](#), [28](#), [31](#), [33](#), [34](#), [36](#), [37](#), [38](#), [39](#), [40](#), [41](#), [166](#)
- Laborenergie** basé sur le projet [Laborem](#), ce projet vise à optimiser les consommations énergétiques d'un bâtiment à l'aide du logiciel de supervision libre [PyScada](#). [41](#), [117](#), [124](#)
- LMS** Système de gestion de l'apprentissage, *Learning Management System* en anglais. Plateforme numérique permettant de créer, gérer, suivre et diffuser des contenus de formation en ligne.. [27](#), [29](#), [30](#), [33](#)
- LoRa** *Long Range* en anglais, technologie de modulation radio longue portée (jusqu'à 2–5 km en ville, 10–15 km en zone dégagée) et basse consommation, utilisée principalement pour les communications IoT (Internet des objets).. [127](#), [129](#)
- Modbus** (abréviation de *Modicon Bus*) est un protocole de communication développé en 1979 par Modicon (aujourd'hui Schneider Electric) pour permettre à des équipements industriels (automates, capteurs, actionneurs) de communiquer entre eux sur des réseaux série ou Ethernet de manière simple et ouverte.. [39](#), [101](#), [107](#)
- MVT** *Model-View-Template* en anglais, patron architectural utilisé notamment dans le framework Django, où **Model** gère les données et la logique métier, **View** contrôle la logique applicative et prépare les données à afficher et **Template** s'occupe de la présentation en générant le contenu HTML visible par l'utilisateur. [107](#), [165](#)
- NLM** *Non-Linear Modeling* en anglais, approche de modélisation mathématique non linéaire. [50](#), [54](#)
- OEI** Observateur à entrées inconnues. [16](#), [18](#), [19](#), [20](#)
- OneWire** protocole de communication série développé par Dallas Semiconductor (aujourd'hui Maxim Integrated), qui permet à des appareils numériques de communiquer via une seule ligne de données et d'une masse. [39](#), [107](#)

- OPC-UA** *Open Platform Communications Unified Architecture* en anglais, standard de communication sécurisé et indépendant de la plateforme utilisé dans l'automatisation industrielle pour permettre l'échange fiable et interopérable de données entre équipements . 39, 107
- PHT** Équipe Procédés Haute Tension du laboratoire SIAME . 25
- PID** *Persistent Identifier* en anglais, identifiant unique et stable attribué à une ressource numérique qui garantit son accès fiable et durable, même si son emplacement ou son URL change avec le temps. 103, 111
- PSGAR** Programmes Scientifiques de Grande Ambition Régionale initiés par la Région Nouvelle-Aquitaine. Le programme CERENA signifie Contribution de la Nouvelle-Aquitaine à la souveraineté énergétique nationale juste et bas carbone. Il est porté par l'UPPA.. 124, 129, 133
- PTAM** *Parallel Tracking And Mapping* en anglais, technique de réalité augmentée qui permet de suivre en temps réel la position d'une caméra tout en construisant une carte 3D de l'environnement, en séparant le suivi (tracking) et la cartographie (mapping) dans deux processus parallèles. 49, 59
- PyScada** Un système **SCADA** open source avec une interface HMI en HTML5, développé à l'aide du framework Django. Le projet est sous licence GNU Affero General Public License v3 (AGPLv3). Lien : <https://github.com/pyscada/PyScada>. 5, 14, 38, 40, 76, 99, 106, 107, 108, 109, 110, 111, 112, 113, 114, 115, 116, 117, 118, 119, 124, 129, 133, 134, 166
- SBC** *Single Board Computer* en anglais, ordinateur complet miniaturisé sur une seule carte électronique, intégrant processeur, mémoire, stockage et connectique. 36, 40, 114, 127
- SCADA** *Supervisory Control And Data Acquisition*, en anglais. Système de contrôle et d'acquisition de données. 29, 40, 106, 167
- Serial** (ou communication série) désigne un mode de transmission de données où les bits sont envoyés les uns après les autres sur une seule ligne de communication, permettant la transmission séquentielle d'informations entre dispositifs électroniques. 39, 107
- SIAME** Unité de recherche de l'UPPA : Laboratoire des sciences pour l'ingénieur appliquées à la mécanique et au génie électrique . 25, 71, 118, 125, 166
- Sirena** réseau d'observation et de suivi des risques côtiers sur la Côte Basque. L'infrastructure Sirena est l'objet d'un développement commun au sein de **KOSTARISK**. L'outil est accessible à l'adresse : <https://sirena.univ-pau.fr/>. 5, 99, 116
- SLAM** *Simultaneous Localization And Mapping* en anglais, méthode utilisée en robotique et en vision par ordinateur pour permettre à un système de se localiser dans un environnement inconnu tout en construisant simultanément la carte . 48, 49, 56, 57
- SLNS** Système linéaire non stationnaire, *Linear Time Varying* en anglais. 16, 19, 20
- SLS** Système linéaire stationnaire. 16, 18, 20
- SML** *Smart Message Language* en anglais, protocole de communication standardisé utilisé principalement pour l'échange de données entre compteurs d'énergie intelligents (compteurs électriques, gaz, eau) et systèmes de gestion . 107
- STD** La Simulation Thermique Dynamique est une méthode de calcul qui modélise l'évolution des températures d'un bâtiment dans le temps pour évaluer son confort thermique et ses performances énergétiques.. 117, 133

UPPA Université de Pau et des Pays de l'Adour. [14](#), [15](#), [25](#), [27](#), [40](#), [41](#), [117](#), [123](#), [124](#), [128](#), [133](#), [146](#), [149](#), [150](#), [151](#), [153](#), [154](#), [157](#)

VISA *Virtual Instrument Software Architecture* en anglais, interface de programmation standardisée développée par National Instruments (et d'autres membres du consortium VXIplugandplay) pour permettre la communication entre un ordinateur et des instruments de mesure via divers protocoles, de manière unifiée et indépendante du matériel. [38](#), [39](#), [107](#)

webservice application accessible via Internet ou un réseau, qui permet à différents systèmes ou logiciels de communiquer et d'échanger des données de manière standardisée, souvent en utilisant des protocoles comme HTTP et des formats comme XML ou JSON. [39](#), [107](#), [115](#)

WIP *Wave Impact Pressure* en anglais, station mobile de mesure de pression d'impact de vagues submersion. [5](#), [123](#), [124](#), [125](#), [127](#)