



**HAL**  
open science

## Des réseaux de capteurs sans fil à l'intelligence ambiante dans le suivi environnemental. Synthèse de travaux.

Thierry Antoine-Santoni

### ► To cite this version:

Thierry Antoine-Santoni. Des réseaux de capteurs sans fil à l'intelligence ambiante dans le suivi environnemental. Synthèse de travaux.. Modélisation et simulation. Université de Corse Pasquale Paoli, 2019. tel-02444772

**HAL Id: tel-02444772**

**<https://hal.science/tel-02444772v1>**

Submitted on 19 Jan 2020

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

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



Université de Corse Pasquale Paoli

Unité Mixte de Recherche CNRS 6134

Sciences Pour l'Environnement



## HABILITATION A DIRIGER DES RECHERCHES

Présentée par

Thierry ANTOINE- SANTONI

---

# Des réseaux de capteurs sans fil à l'intelligence ambiante dans le suivi environnemental

Synthèse de travaux

---

Soutenue publiquement le 2 décembre 2019 devant le jury composé de :

Mme Oumaya Baala, MCF-HDR, Université de Technologie Belfort-Montbéliard (Rapporteur)

M. Dominique Gignac, Professeur, Université de Bourgogne (Rapporteur)

M David Hill, Professeur, Université de Clermont-Ferrand (Rapporteur)

M. Antoine Aiello, Professeur, Università di Corsica

M Dominique Federici, Professeur, Università di Corsica

M. Stefano Chessa, Professeur, Université de Pise



Université de Corse Pasquale Paoli

Unité Mixte de Recherche CNRS 6134

Sciences Pour l'Environnement



## HABILITATION A DIRIGER DES RECHERCHES

Présentée par

Thierry ANTOINE- SANTONI

---

# Des réseaux de capteurs sans fil à l'intelligence ambiante dans le suivi environnemental

Synthèse de travaux

---

Soutenue publiquement le 2 décembre 2019 devant le jury composé de :

Mme Oumaya Baala, MCF-HDR, Université de Technologie Belfort-Montbéliard (Rapporteur)

M. Dominique Gignac, Professeur, Université de Bourgogne (Rapporteur)

M. David Hill, Professeur, Université de Clermont-Ferrand (Rapporteur)

M. Antoine Aiello, Professeur, Università di Corsica

M. Dominique Federici, Professeur, Università di Corsica

M. Stefano Chessa, Professeur, Université de Pise

*À i mei...*

---

## Remerciements

---

Je tiens tout d'abord à remercier Madame Oumaya Baala, MCF-HDR à l'Université de Technologie Belfort-Montbéliard, Monsieur Dominique Ginjac, Professeur à l'Université de Bourgogne, et Monsieur David Hill, Professeur à l'Université de Clermont-Ferrand, d'avoir accepté d'être les rapporteurs de ce document.

Je témoigne ma reconnaissance à M. Antoine Aiello, Professeur à l'Université di Corsica pour avoir accepté de m'accompagner dans ce cheminement professionnel et scientifique, pour m'avoir toujours associé aux programmes de recherche portés par l'UMS UCPP-CNRS 3514 Stella Mare.

Je remercie Monsieur Dominique Federici, Professeur à l'Université di Corsica, et Monsieur Stefano Chessa, Professeur à l'Université de Pise d'avoir accepté de participer à ce jury.

---

## Préambule

---

Ma carrière professionnelle en milieu universitaire a officiellement débuté en septembre 2010, lors de mon recrutement en tant que Maître de Conférences à l'Université di Corsica. Cette étape importante fait suite à un doctorat obtenu en décembre 2007, et à deux contrats d'Attaché Temporaire d'Enseignement et de Recherche (A.T.E.R).

Très rapidement, j'ai été sollicité pour participer aux tâches administratives, aux responsabilités pédagogiques de l'établissement jusqu'à mon élection en tant que Vice-Président du Conseil des Études et de la Vie Universitaire (CEVU), seulement deux ans après mon recrutement. Mon parcours fait, bien entendu, état de ces différentes contributions au service du projet de l'Université de Corse, que ce soit au niveau de la formation, de la vie universitaire, des relations internationales ou des actions en faveur de l'innovation pédagogique et du numérique. Cela intègre naturellement, mes contributions scientifiques au travers de projets de recherche, d'encadrements d'étudiants (Master et doctorants), du management de personnels de recherche, de la valorisation et la diffusion scientifique. Il est nécessaire de considérer que cet investissement important et précoce, dans des fonctions et des responsabilités très lourdes et chronophages, caractérise mon parcours professionnel. Cet investissement m'a permis d'appréhender la diversité des missions qui composent le monde universitaire, et d'en appréhender sa complexité au niveau local, national et international.

Ce document introduit dans un premier temps, mon parcours universitaire en exposant mes responsabilités administratives et pédagogiques, ma participation à différents programmes de recherche. Dans un second temps, je propose un mémoire scientifique qui analyse l'ensemble de mes contributions, de mes travaux dans la thématique du déploiement et du développement des réseaux de capteurs sans fil pour l'observation et le suivi d'incendies, de différents sites industriels et naturels, d'êtres vivants marins ou terrestres, amenant progressivement mes activités de recherche vers l'intelligence ambiante.

## SOMMAIRE

<b>FICHE D'IDENTITE.....</b>	<b>8</b>
<b>PARCOURS UNIVERSITAIRE (DIPLOMES ET QUALIFICATIONS).....</b>	<b>8</b>
<b>ACTIVITES ADMINISTRATIVES.....</b>	<b>9</b>
RESPONSABILITES ADMINISTRATIVES .....	9
PARTICIPATION A DES CONSEILS CENTRAUX ET AUTRES .....	12
<b>ENSEIGNEMENT ET RESPONSABILITES PEDAGOGIQUES.....</b>	<b>13</b>
<b>ACTIVITES SCIENTIFIQUES.....</b>	<b>17</b>
ENCADREMENTS .....	17
<i>Codirection de thèse.....</i>	<i>17</i>
<i>Encadrement de stage de recherche.....</i>	<i>17</i>
<i>Encadrement de personnels de recherche.....</i>	<i>18</i>
PROJETS SCIENTIFIQUES ET CAMPAGNE EXPERIMENTALE .....	18
<i>Campagne expérimentale (2009 - 2010).....</i>	<i>18</i>
<i>Participation programme de développement de RCSF - EDF (2010 - 2012).....</i>	<i>19</i>
<i>Participation au programme RES-MAR (2010 - 2012).....</i>	<i>19</i>
<i>Participation au programme scientifique AMBIENTE (2012 - 2015) .....</i>	<i>19</i>
<i>Participation au programme scientifique HAL1 et 2 (2014 -2020).....</i>	<i>19</i>
<i>Coordination du programme scientifique Smart Village (2017 - 2020).....</i>	<i>19</i>
ACTIVITES SCIENTIFIQUES DIVERSES.....	20
<b>PUBLICATIONS :.....</b>	<b>21</b>
<b>MEMOIRE SCIENTIFIQUE.....</b>	<b>24</b>
<b>1 INTRODUCTION.....</b>	<b>26</b>
<b>2 LES RESEAUX DE CAPTEURS SANS FIL .....</b>	<b>28</b>
2.1 ÉLÉMENTS DE DEFINITION .....	28
2.2 MODELISATION ET SIMULATION D'UN RCSF (SYNTHESE DES TRAVAUX DE THESE) .....	34
2.2.1 <i>Aspects généraux de la modélisation et de la simulation .....</i>	<i>34</i>
2.2.2 <i>Formalisme à évènements discrets DEVS (Discrete Event System Specification).....</i>	<i>36</i>
2.2.3 <i>DEVS-WSN : librairie de modèles DEVS pour les RCSF.....</i>	<i>39</i>
2.2.4 <i>Résultats obtenus dans la simulation de RCSF à l'aide de la bibliothèque DEVS-WSN .....</i>	<i>41</i>
2.2.5 <i>Résultats dans la simulation de scénarios de feu de forêts.....</i>	<i>43</i>
2.3 CONTRIBUTIONS A L'OPTIMISATION DU DEPLOIEMENT DES RCSF .....	45
2.4 CARACTERISATION DE PERFORMANCES DE RCSF EN OBSERVATION REELLE D'INCENDIE .....	53
2.4.1 <i>Matériels dans le cadre des expérimentations.....</i>	<i>54</i>

2.4.2	<i>Méthodes expérimentales</i> .....	57
2.4.3	<i>Les résultats obtenus</i> .....	58
2.5	DEPLOIEMENT POUR LA SURVEILLANCE DE RESERVE EN EAU (2010-2012).....	65
2.6	TESTS ET DEVELOPPEMENT DE DISPOSITIFS POUR LE SUIVI DU VIVANT (2012-2020).....	68
2.6.1	<i>Caractérisation de dispositifs marins</i> .....	68
2.6.2	<i>Développement de dispositifs de suivi terrestre (2011-2014)</i> .....	74
2.7	CONCLUSION.....	82
<b>3</b>	<b>L'INTELLIGENCE AMBIANTE</b> .....	<b>83</b>
3.1	INTRODUCTION AUX CONCEPTS .....	83
3.2	CONTRIBUTIONS AU DEVELOPPEMENT DE SYSTEMES D'INFORMATION PERVASIF POUR LE SUIVI ENVIRONNEMENTAL .....	87
3.2.1	<i>Le RCSF utilisant LoRaWAN</i> .....	88
3.2.2	<i>Proposition d'un modèle de prédiction intégré au SIP</i> .....	90
3.2.3	<i>Résultats de prédiction</i> .....	92
3.2.4	<i>La gestion des données</i> .....	96
3.3	CONCLUSION.....	97
<b>4</b>	<b>PERSPECTIVES DE RECHERCHE</b> .....	<b>98</b>
4.1	DEVELOPPEMENT DES SYSTEMES EMBARQUES INTELLIGENTS.....	99
4.2	PREDICTION DE COMPORTEMENT D'ETRES VIVANTS .....	99
4.3	VERS UN NOUVEL OUTIL SCIENTIFIQUE DE SUIVI ET DE PRESERVATION DE L'ENVIRONNEMENT .....	100
	BIBLIOGRAPHIE .....	101
	TABLES DES ILLUSTRATIONS .....	106
	TABLEAUX.....	108
	PUBLICATIONS DE REFERENCE.....	109



## FICHE D'IDENTITE

- ENSEIGNANT-CHERCHEUR en informatique
- 40 ans
- Marié, 2 enfants
- Lieu dit Nascichella, 20148 Cozzano
- Qualifié aux fonctions de Maître de conférences en informatique (2008), section CNU 27.
- Enseignant à la Faculté des Lettres, Langues, Arts et Sciences Humaines et Sociales de l'Université di Corsica.
- Membre de l'Unité Mixte de Recherche Université di Corsica - CNRS 6134 Sciences pour l'Environnement

## PARCOURS UNIVERSITAIRE (diplômes et qualifications)

- Mars 2016 : Diplôme de l'école de printemps du Management de l'Innovation à l'Université Catholique de Lille, MOSAIC HEC Montréal
- Septembre 2010 : recruté en tant que Maître de conférences à l'Université di Corsica
- Septembre 2009 : Chargé d'Enseignement
- Septembre 2007 - 2009 : ATER en informatique
- Février 2008 : Qualifié aux fonctions de Maître de conférences pour la section CNU 27
- 14 Décembre 2007 : diplômé de l'Université di Corsica avec un doctorat en Informatique : *Vers l'application des réseaux de capteurs sans fil dans la problématique des feux de forêt : Modélisation, Simulation et plate-forme expérimentale.* - Mention très honorable
- Juillet 2004 : DEA de Sciences Physiques Pour l'Environnement (AB)
- Juillet 2003 : DESS en Informatique
- Juillet 2002 : Maitrise de Biologie
- Juillet 2001 : Licence de Biologie

## ACTIVITES ADMINISTRATIVES

Depuis 2009, j'ai été amené à participer de manière régulière et progressive à l'activité de l'Université di Corsica. Dans une première partie, je décris les charges administratives qui ont été les miennes depuis 2009. Puis dans une deuxième partie, je précise ma participation aux différents conseils de composantes et centraux.

### Responsabilités administratives

#### **Responsable des certifications en informatique (2008 - 2012)**

En septembre 2009, il m'a été proposée la responsabilité pédagogique des certifications en informatique à l'Université di Corsica, en particulier le Certificat Internet et Informatique (C2I). Dans le cadre de ces nouvelles fonctions, j'ai choisi de mener un audit en interne et de le proposer sous forme de rapport<sup>1</sup> au Vice-Président en charge de la Formation et de la Vie Universitaire, le Professeur Georges Moracchini. Ce rapport a été co-rédigé avec le Vice-Doyen de la Faculté des Sciences et Techniques, Monsieur Christophe Paoli. Il a permis la mise en place d'un certificat informatique harmonisé au niveau des objectifs et des volumes horaires.

J'ai également initié, en 2011, la mise en place de la formation dans le cadre de la certification «Informatique et Sciences du Numérique» (ISN) destinée à des enseignants du 2<sup>nd</sup> degré.

En janvier 2011, je suis tout d'abord élu comme membre du Conseil des Études et de la Vie Universitaire (C.E.V.U.) et ensuite comme Vice-Président du CEVU quelques mois plus tard.

#### **Vice-Président en charge des Études et de la Vie Universitaire (Février 2012 à Février 2016)**

En Février 2012, J'ai été élu comme Vice-Président de l'Université di Corsica, en charge de la Formation et de la Vie Universitaire (C.E.V.U.). Durant ce mandat, j'ai géré de nombreux dossiers relatifs à cette fonction. Mais j'ai également été amené à faire de nombreuses propositions, détaillées dans les parties suivantes. J'ai collaboré à la rédaction de la convention tri-partite qui lie l'État, l'Université di Corsica et la Collectivité de Corse dans les domaines de la formation, de la vie universitaire et de la recherche.

---

<sup>1</sup> Rapport interne, « Le C2i à l'Université de Corse - Pasquale PAOLI : Harmonisation, organisation du niveau 1 et projet de niveau 2 », T. Antoine-Santoni, C. Paoli.

### **Actions en faveur de la formation :**

- Conduite de la campagne d'accréditation de l'offre de formation de l'Université di Corsica 2013 – 2018.
- Mise en place d'une commission Licence pour l'évolution du cycle de Licence et pour favoriser le continuum Bac+3 - Bac-3. (Rédaction d'un rapport).
- Accompagnement au passage de l'Institut Universitaire de Formation des Maîtres (IUFM) à l'École Supérieure du Professorat et de l'Éducation (ESPE de Corse).
- Proposition de restructuration de la Direction des Études et de la Vie Universitaire (DEVU) en pôles, facilitant la visibilité des missions et des interactions.
- Mise en place d'un pilotage des composantes en charge de la formation intégrant une démarche qualité (rédaction d'une feuille de route : Axe 1 - Pilotage et démarche Qualité – 2013 (plus de 50 réunions menées durant 24 mois)).
- Coordination du projet Européen e-s@pè sur la création de cours en ligne gratuit et pour tous (réunissant 5 partenaires européens, projet financé par le Fond Social Européen 2012-2014).
- Co-Production d'un rapport/audit sur les pratiques pédagogiques innovantes au sein des formations de l'Université di Corsica (Rapport e-s@pè).
- Création d'un Diplôme Universitaire en 2015 pour l'accueil et la formation des enseignants-chercheurs nouvellement recrutés à l'université.

### **Actions en faveur de la Vie Universitaire**

- Mise en place d'une convention cadre entre le CROUS de Corse et l'Université di Corsica en plaçant les étudiants comme les acteurs essentiels de cette action.
- Accompagnement à la mise en place du Schéma Régional d'Aide à la Vie Étudiante (2015-2020) avec la Collectivité de Corse.
- Création d'une commission inter-services pour l'aide sociale.
- Création des journées Allegria (journées culturelles et sportives pour célébrer la rentrée universitaire).
- Divers événements relatifs à l'innovation pédagogique (vaghjime d'e-s@pè, série de conférences, séminaires et ateliers autour de l'innovation pédagogique).

### **En charge des relations internationales de l'Université di Corsica 2013-2014**

Suite à la vacance du poste de Vice-Président en charge des relations internationales, j'ai été proposé pour assurer l'interim entre 2013 et 2014. Cela m'a permis d'accueillir de nombreuses délégations

venues de différentes universités, européennes essentiellement (Espagne, Italie, Autriche), et de renforcer les liens autour de deux axes majeurs dans l'action internationale :

- Séjour en Ecosse dans le cadre du renforcement des relations du Réseau d'Excellence des Territoires Insulaires (RETI) avec l'Université des Hautes Terres d'Ecosse (University of Highlands and Islands) ;
- Travaux sur la convention de partenariat avec les Universités Italiennes dans le cadre de l'Association de Recherche et de Coopération Euro-méditerranéenne (Université de Nice, de Toulon, Paris VI, de Gènes, de Pise et de Turin).

Durant cet interim, j'ai rédigé un document cadre pour la régulation des délocalisations à l'étranger des formations de l'Université di Corsica.

### **Vice-Président en charge du Numérique et Innovation pédagogique (Février 2016 - Février 2020)**

Cette Vice-Présidence, nouvellement créée au sein de l'Université di Corsica, fait suite au « Rapport e-s@pè ». L'objectif est d'accompagner le changement autour des pratiques pédagogiques et du numérique. Pour me préparer à cette nouvelle fonction, j'ai assisté en 2016 à l'école de printemps sur le management de la créativité et de l'innovation de l'Université Catholique de Lille (Mosaic 2016) en partenariat avec HEC Montréal. Depuis 2016, j'ai développé un certain nombre de projets structurants et j'ai proposé également l'organisation de nombreux évènements :

- constitution d'une feuille de route dans le cadre du numérique et de l'innovation pédagogique avec un portefeuille de projets.
- lancement du projet « Un Learning Lab par Campus » lors d'un appel à contribution. La première salle innovante témoin est prévue pour octobre 2019 sur la Faculté des Lettres, Langues, Arts, Sciences Humaines et Sociales.
- co-organisation en Février 2018 d'une journée de sensibilisation sur l'approche programme - approche compétences.
- co-organisation avec le département informatique des Hackatons 2018 , 2019 et 2020 ;
- co-organisation entre l'université (ESPE de Corse) et la cellule CARDIE de l'Académie de Corse des forums de l'innovation en 2018 et 2019.
- co-élaboration du projet d'Institut de Recherche et d'Enseignement des Sciences (IRES de Corse) qui a été présenté en décembre 2018 à l'ADIREM (<http://www.univ-irem.fr/spip.php?article1505>).

- co-organisation avec le Centre national de la Fonction Publique Territoriale (CNFPT) de Corse, de la 4<sup>ème</sup> édition de l'Université Européenne de l'Innovation Publique territoriale en juillet 2019 à Corte.

## Participation à des conseils centraux et autres

Depuis 2017 : Élu au conseil de la Faculté des Lettres, Langues, Arts Sciences Sociales et Humaines.

Membre de la commission électorale depuis Mars 2016.

Depuis Février 2016 : Élu au Conseil d'Administration.

de 2012 à 2016 : Vice-Président du Conseil des Études et de la Vie Universitaire.

Janvier 2011 à décembre 2011 : Élu au conseil des Études et de la Vie Universitaire.

## ENSEIGNEMENT ET RESPONSABILITES PEDAGOGIQUES

La grande majorité de mon activité d'enseignant s'est déroulée sur la Faculté des Lettres, Langues, Arts Sciences Sociales et Humaines dans le cadre de la préparation aux certifications informatiques suite à mon recrutement en tant que Maître de Conférences en septembre 2010. Cependant, j'interviens également de manière plus spécialisée sur la Faculté des Sciences et Techniques et à l'École d'Ingénieurs PaoliTech, dans les thématiques liées à mon activité de recherche. De plus, mon parcours de Vice-Président en charge du Numérique et de l'Innovation pédagogique m'a amené à travailler sur les sujets liés à l'innovation pédagogique et au numérique pour l'éducation et la formation. Je présente dans cette partie la répartition de mes enseignements, illustrée par le Tableau 1. Il est important de préciser que j'ai bénéficié d'un service aménagé d'enseignement durant les années de Vice-Présidence (décharge complète puis partielle).

Tableau 1 : Répartition des Enseignements pour l'année 2018 -2019

<b>Public</b>	<b>Structure</b>	<b>Contenu</b>	<b>Volume Horaire</b>
L2 et L3 Étudiants de filière littéraire	FLLASHS	PIX Compétences Numériques et Informatique	30h eq. TD (TD)
M1 Informatique	FST	Les Réseaux pour l'IoT	66h eq TD (CM, TD, TP)
1ère année école ingénieur	École d'ingénieurs PaoliTech	Immersion sur projet scientifique	22,5h eq TD (CM, TD, TP)
2ème année école ingénieur	École d'ingénieurs PaoliTech	Projet industriel - IoT	22,5h eq. TD (CM, TD, TP)
M2 MEEF	ESPE	Innovation pédagogique et numérique	54,25 eq. TD

## Détails de quelques enseignements

### **Certification C2i niveau 1 / Passage au certificat Pix (24 TD )**

**Public :** L2 et L3, Étudiants de filière littéraire

**Description :** L'objectif de cette unité d'enseignement est de préparer les étudiants à la certification C2i niveau 1. Le déroulement des modules se construit autour du référentiel « Certificat informatique et internet de l'enseignement supérieur » (circulaire n° 2011-0012 du 6 Juin 2011). Les étudiants sont formés au travail collaboratif, à la responsabilité numérique, à l'utilisation des principaux outils bureautiques ainsi qu'à la recherche d'informations. Le passage récent à la nouvelle certification PIX a modifié l'approche pour proposer l'intégration de modules relatifs à l'initiation à l'algorithmique et une validation de niveaux de compétences à travers une plate-forme en ligne nationale.

Cette unité d'enseignement permet de développer un ensemble de compétences dans le domaine du numérique. Orientée vers une approche par compétences, cette préparation à la certification s'articule autour de TDs individuels et en groupes.

### **Internet des Objets (responsable de l'UE) (66 h eq CM - TD -TP)**

**Public :** Master Informatique Développeur Full Stack

**Description :** Ce cours a pour objectif de mettre en contexte l'utilisation des objets connectés dans le cadre du développement des villes et des bâtiments intelligents. L'ensemble des interventions permet de positionner les bases du déploiement d'une infrastructure réseau, de connaître les standards de communication dans le domaine, de travailler la sécurité des réseaux d'objets connectés et d'aborder différents cas d'application. Une introduction globale sur la ville intelligente est proposée avec la mise en contexte des objets connectés. Un survol global des systèmes embarqués est réalisé avec un focus particulier sur les objets connectés au service de la surveillance environnementale.

Une partie de l'enseignement est consacré à l'étude des supports de développement existants (plate-forme de développement grand public ou industrielle), des notions d'électronique de base, afin de positionner les éléments matériels avant la mise en pratique dans le cadre de TPs.

### Projet industriel - objets connectés (40 h eq CM - TD -TP)

**Public :** 2<sup>ème</sup> année d'École d'Ingénieurs PaoliTech.

**Description :** Ce cours a pour objectif de mettre en contexte l'utilisation des objets connectés dans le cadre du développement des villes et des bâtiments intelligents correspondant aux objectifs de formation de l'école. L'intervention permet de comprendre les enjeux du déploiement des objets connectés dans les bâtiments modernes, et il permet de développer des compétences dans la réalisation d'un projet industriel utilisant des objets connectés. Une mise en relief des contraintes liées au déploiement de l'IoT est réalisée avec une approche complémentaire autour du prototypage dans le cadre de projets réels.

### Semaine Immersion projet scientifique (22,5 h eq CM - TD -TP)

**Public :** 1<sup>ère</sup> année d'École d'Ingénieurs PaoliTech.

**Description :** Ce programme a pour but de d'immerger les étudiants dans un programme Scientifique Smart Village. Durant une semaine, ils procèdent à des actions d'enquêtes ethnographiques, d'interactions avec la population pour proposer des actions en faveur du développement durable.

**Apport pédagogique :** Cette semaine organisée en travail par groupes permet de découvrir le fonctionnement d'un programme de recherche, et d'être en contact avec les sociétés partenaires EDF - SITEC. Les étudiants développent des compétences en matière de collecte d'informations qualitatives, de synthèse et de propositions de solutions concrètes.

### Certification C2i niveau 2 Métier de l'enseignement ( 18 h TD)

**Public :** Master 2 MEEF (métiers de l'enseignement, de l'éducation et de la formation)

**Description :** L'objectif du « C2i 2 métiers de l'enseignement » (C2i2E) est de former les futurs enseignants à l'usage du numérique dans le cadre de leur activité. Le programme de ce certificat est défini dans l'arrêté du 14 Décembre 2010 (NOR ESRS1000461A). Il s'articule autour de deux grands domaines. Le domaine A cible les compétences générales liées à la profession d'enseignant. Le domaine B concerne les compétences liées à la préparation de contenus pédagogiques ainsi que les situations d'apprentissage pour lesquelles l'usage des outils numériques est essentiel.

**Apport pédagogique :** Cette unité d'enseignement s'adresse à un public de niveau très hétérogène. Durant les séances de travail, les étudiants sont amenés à débattre sur l'intérêt de différentes technologies dans le cadre de leurs activités. L'objectif est de les sensibiliser à l'usage de l'informatique et du numérique dans leur future activité professionnelle. La validation se fait par le biais d'un Dossier Numérique de Compétences (DCN) et d'un oral autour d'un projet réalisé ou fictif.



Je suis intervenu également durant ma carrière sur d'autres types d'enseignements, durant mes premières années :

- Introduction à l'Algorithmique et à la Programmation (Licence - FST)
- Algorithmie et Structure de Données (Licence - FST)
- Les réseaux sans fil (Master - FST)
- - Conception Multimédia (Licence - FST)

### **Responsabilités pédagogiques**

J'ai été le responsable des certifications informatiques de 2008 à 2012.

Je suis désormais responsable de l'Unité d'Enseignement Internet des Objets du Master Informatique Full Stack de l'Université di Corsica.

On m'a également confié la responsabilité pédagogique du D.U. Devenir un acteur de l'Université, une formation destinée aux enseignants-chercheurs nouvellement recrutés. L'arrêté du 8 février 2018 fixe le cadre national de cette formation, visant à l'approfondissement des compétences pédagogiques des maîtres de conférences stagiaires. Dans ce cadre, il est prévu dans ce cadre pour cette formation :

- d'approfondir les compétences pédagogiques générales ou spécifiques au champ disciplinaire nécessaires à l'exercice du métier d'enseignant-chercheur ;
- d'inscrire dans le cadre des actions d'accompagnement et de formation de l'établissement à destination des personnels ;
- de sensibiliser les maîtres de conférences stagiaires à différentes méthodes d'enseignement, à l'utilisation d'approches et d'outils variés ;
- de permettre de s'adapter à la diversité des publics et d'assurer un accompagnement et une évaluation des acquis des apprentissages.

## ACTIVITES SCIENTIFIQUES

Le cadre de mes activités de recherche a été défini en grande partie par ma participation à des programmes scientifiques. Mais, il l'a été également par mon travail d'encadrement d'étudiants, de personnels sur des projets de recherche.

### Encadrements

Codirection de thèse

Depuis 2012, je suis associé en tant que co-directeur de thèse dans les disciplines informatiques :

Co-directeur de thèse de Monsieur Bastien Poggi (Directeur Pr. Jean-François Santucci) :  
Développement de concepts et d'outils d'aide à la décision pour l'optimisation via simulation :  
Intégration des métaheuristiques au formalisme DEVS.

#### **Thèse soutenue en décembre 2014.**

Co-directeur de thèse de Monsieur Marcello Nuvoli (Directeur Pr. Dominique Federici) :  
Modélisation d'un processus de gestion et de stockage des données dans le cadre du Règlement Général de la Protection des Données (RGPD).

#### **Thèse débutée en Novembre 2016 (temporairement arrêtée pour des raisons de santé).**

Co-directeur de thèse de Monsieur François-Marie Manicacci (Directeur Pr. Antoine Aiello) :  
Apprentissage automatisé en temps réel de comportement de systèmes induit par la collecte de données issues d'objets connectés.

#### **Thèse débutée en Novembre 2018.**

Encadrement de stage de recherche

**2010 - Master 2**- Modélisation et simulation DEVS - Création de bibliothèques de modèles et d'outils d'aide à la décision - application aux réseaux de capteurs sans fil (Bastien Poggi)

**2018 - Master 2** : Test et validation d'un dispositif connecté de suivi d'espèces terrestres (François-Marie Manicacci)

**2019 - Master 2** : Développement et mise en situation expérimentale d'objets connectés de géolocalisation (Stefanu Zamboni)

**2019 Master 2** : Caractérisation de performances de transmission LoraWAN par drone ( M Alexandre Mameli)

-----  
**2009 - Master 1** : Étude d'un Réseau de capteurs sans fils (RCSF) : Système d'exploitation TinyOS et applications (Bastien Poggi)

**2017 - Master 1** : Développement d'application Web pour le suivi d'espèces terrestres (François-Marie Manicacci)

**2019 Master 1** : Développement d'un modèle DEVS pour la culture de précision utilisant des algorithmes de Machine Learning (Stéphane Lanfranchi)

-----  
**2018 - Licence 3** : Intégration d'un outil de génération de QR codes à partir de données issues d'objets connectés. ((Stéphane Lanfranchi) (1 mois)

Encadrement de personnels de recherche

J'encadre à 100% depuis septembre 2007, une équipe d'ingénieurs dans le cadre du programme scientifique Smart Paesi :

Ho Van Hieu : Ingénieur d'études en calcul scientifique, dont l'objectif est de contribuer au développement des outils d'intelligence artificielle.

David Araujo : Ingénieur d'études en instrumentation scientifique dont les travaux consistent à accompagner le développement et les tests d'objets connectés du programme scientifique.

Anthony Paolini : Technicien en gestion administrative, pilotage financier et relais de communication

## **Projets scientifiques et campagne expérimentale**

### **Campagne expérimentale (2009 - 2010)**

J'ai participé à une campagne expérimentale utilisant des réseaux de capteurs sans fil dans le suivi de la propagation des feux à l'INRA AVIGNON en 2010 (direction IGR Xavier Silvani et Frédéric Morandini). L'étude s'est déroulée au sein du plateau technique de Vignères, rattaché à l'unité Écologie des Forêts Méditerranéennes. Ce plateau permet l'étude de la combustibilité des litières et de la propagation des incendies.

#### **Participation programme de développement de RCSF - EDF (2010 - 2012)**

J'ai participé à un projet de développement et de caractérisation d'un réseau de détection sans fil d'incendie sur un site industriel, financé par EDF SEI. (Direction Xavier Silvani).

#### **Participation au programme RES-MAR (2010 - 2012)**

J'ai participé au projet RES-MAR, projet Européen MArritimo, Action G (Direction Pr. Jean-François Santucci) : Consolidation d'un modèle de caractérisation et de gestion d'un bassin hydrique. J'ai été en charge du déploiement d'un réseau de capteurs sans fil dans le suivi du niveau d'un bassin de rétention d'eau pour alimenter les données du modèle développé (2013 - 2015).

#### **Participation au programme scientifique AMBIENTE (2012 - 2015)**

J'ai participé au programme AMBIENTE (AMBIent Intelligence for ENvironment using Technical Efficiency) (direction Pr. Antoine Aiello) à l'UMS Università di Corsica - CNRS 3514 Stella Mare. J'ai contribué au développement d'objets connectés dans le suivi du vivant et la modélisation/simulation de systèmes vivants.

#### **Participation au programme scientifique HAL1 et 2 (2014 -2020)**

J'ai participé aux programmes HAL 1 et 2, portés par l'UMS Università di Corsica - CNRS 3514 Stella Mare. Ces programmes visent à bâtir un système de collecte d'informations basé sur les réseaux de capteurs, intégrant in fine le temps réel. Ils permettent ainsi de fournir les données nécessaires à l'élaboration et la validation d'un modèle de simulation comportementale, d'analyse de la dynamique des populations et des interactions au sein de la chaîne tropho-dynamique des écosystèmes observés. Je participe aux phases de développement des objets connectés et de modélisation – simulation.

#### **Coordination du programme scientifique Smart Village (2017 - 2020)**

Je suis le porteur et le responsable du programme scientifique Smart Village – Smart Paesi : Émergence de territoires intelligents. L'objectif est l'optimisation de la gestion des ressources et des activités d'une commune en milieu rural, par le biais de l'utilisation des réseaux de capteurs sans fil et des algorithmes d'apprentissage automatisé supervisé. EDF SEI et la SITEC sont partenaires du projet, qui est une réponse à un appel à projet régional, financé par un fond européen FEDER.

## Activités scientifiques diverses

### Relecteur- responsable conférence

- Relecteur régulier pour les revues suivantes : IEEE Transactions for Industrial Informatics, Sensors (mdpi).
- Relecteur pour les conférences suivantes : IEEE MELECON 2008, WINSYS 15, JDF DEVS 16 et 18 – JFMS 2020.
- Membre du comité scientifique des conférence : WINSYS 15, SIMUL 2016, JDF DEVS 16 et 18 – JFMS 2020.
- Chairman : WINSYS 15.
- Co-organisateur du Symposium International sur l'interdisciplinarité - responsable de la session sur le Smart Territories - Juillet 2017.

### Valorisation - vulgarisation

- Séjour de recherche : Février 2015 - Département Informatique - Centre National de la Recherche Italien de Pise.
- Participation aux ateliers « réseaux de capteurs sans fil » dans le cadre du Consortium de Valorisation Thématique de l'Alliance nationale de recherche pour l'Environnement (CVT AllEnvi) Février 2016 à Paris.
- Organisation de la Fête de la science sur Cozzano, en septembre 2017.
- Intervention aux rencontres Numériques Corses (octobre 2017).
- Intervention Chaire scientifique « environnements connectés » le 6 Février 2018 à Nantes.
- Intervention aux journées de l'innovation (Electric Days) d'EDF le 11 octobre 2018 à Paris.
- Intervention aux rencontres des jeunes agriculteurs de Corse : Conférence-débat « Les nouvelles technologies au service de l'agriculture » à Bastellica le 15 Novembre 2018.
- Invitation par la Commission Européenne au Workshop Smart Village (21-22 Février 2019 - Bruxelles).
- Intervention au Centre National de la Fonction Publique Territoriale de Corse sur la thématique des Smart Cities le 18 Septembre 2019 à Ajaccio.

## PUBLICATIONS :

### Articles dans des revues internationales avec comité de lecture

- T. Antoine-Santoni, J.-F. Santucci, E. De Gentili, and B. Costa, "Discrete Event Modeling and Simulation of Wireless Sensor Network Performance," *SIMULATION*, vol. 84, no. 2–3, pp. 103–121, Feb. 2008.
- T. Antoine-Santoni, J.-F. Santucci, E. De Gentili, X. Silvani, and F. Morandini, "Performance of a Protected Wireless Sensor Network in a Fire. Analysis of Fire Spread and Data Transmission," *Sensors*, vol. 9, no. 8, pp. 5878–5893, Jul. 2009.
- J.-S. Gualtieri, A. Aiello, T. Antoine-Santoni, B. Poggi, and E. DeGentili, "Active Tracking of Maja Squinado in the Mediterranean Sea with Wireless Acoustic Sensors: Method, Results and Perspectives," *Sensors*, vol. 13, no. 11, pp. 15682–15691, Nov. 2013.

### Articles dans des ouvrages

- T. Antoine-Santoni, "Émergence de territoires intelligents," in *Inventer l'avenir*, CNRS Edition., CNRS, 2019, pp 147-160

### Articles dans des conférences internationales avec comité de lecture

- T. Antoine-Santoni, J.-F. Santucci, E. de Gentili, and B. Costa, "Using Wireless Sensor Network for Wildfire detection. A discrete event approach of environmental monitoring tool," in *2006 First International Symposium on Environment Identities and Mediterranean Area*, Corte-Ajaccio, France, 2006, pp. 115–120.
- T. Antoine-Santoni, F. Bernardi, and F. Giamarchi, "General Methodology for Metabolic Pathways Modeling and Simulation," in *International Conference on Bioinformatics & Computational Biology*, Las Vegas, Nevada, USA, 2007, pp. 58–64.
- T. Antoine-Santoni, J.-F. Santucci, E. De Gentili, and B. Costa, "Modelling & Simulation oriented components of Wireless Sensor Network using DEVS formalism," in *The proceedings of spring simulation multiconference 2007*, Norfolk, Virginia, 2007, pp. 299–306.
- T. Antoine-Santoni, J.-F. Santucci, E. De Gentili, and B. Costa, "DEVS-WSN : A discrete event approach for Wireless Sensor Network simulation," in *2008 IEEE/ACS International Conference on Computer Systems and Applications*, Doha, Qatar, 2008, pp. 895–898.

- T. Antoine-Santoni, J.-F. Santucci, E. De Gentili, and B. Costa, "Wildfire impact on deterministic deployment of a Wireless Sensor Network by a discrete event simulation," in *MELECON 2008 - The 14th IEEE Mediterranean Electrotechnical Conference*, Ajaccio, France, 2008, pp. 204–209.
- T. Antoine-Santoni, J.-F. Santucci, E. De Gentili, and B. Costa, "Simulation and visualization method of Wireless Sensor Network performances," in *IEEE-SCS International Symposium on Performance Evaluation of Computer and Telecommunication Systems*, San Diego, USA, 2007, pp. 476–483.
- T. Antoine-Santoni, J.-F. Santucci, E. De Gentili, and B. Costa, "Discrete event simulation of a routing protocol in Wireless Sensor Network.," in *The 2007 International Conference on Modeling, Simulation and Visualization Methods*, Las Vegas, Nevada, USA, 2007, pp. 94–100.
- B. Poggi and T. Antoine-Santoni, "Wireless Sensor Network deployment using DEVS formalism and GIS representation," in *International Symposium on Performance Evaluation of Computer & Telecommunication Systems (SPECTS)*, Genoa, Italy, 2012, pp. 1–6.
- B. Poggi, J.-F. Santucci, and T. Antoine-Santoni, "Wireless sensor deployment decision support using genetics algorithm and devs formalism," in *Proceedings of the European Modeling and Simulation Symposium, 2013*, Athens, Greece, 2013, pp. 298–306.
- B. Poggi, J.-F. Santucci, and T. Antoine-Santoni, "Optimization based on dynamic and hybrid metaheuristics via DEVS simulation," in *ACM/SCS Symposium on Theory of Modeling and Simulation - DEVS Integrative*, San Diego, USA, 2014.
- T. Antoine-Santoni, B. Poggi, E. De Gentili, and J.-F. Santucci, "Monitoring corsican dams using Wireless Sensor Network . Using WSN technologies for decision support," in *IEEE Sixth International Conference on Wireless and Mobile Communications*, 2010.
- J.-S. Gualtieri *et al.*, "Localization method according to collected data from an acoustic wireless sensor network," in *Localization method according to collected data from an acoustic wireless sensor network*, Colmar, France, 2015, pp. 33–41.
- T. Antoine-Santoni, J.-S. Gualtieri, F.-M. Manicacci, and A. Aiello, "AMBLoRa: a Wireless Tracking and Sensor System Using Long Range Communication to Monitor Animal Behavior," in *Proceedings of the Seventh International Conference on Smart Cities, Systems, Devices and Technologies*, 35-40, 2018, pp. 35–40.

T. Antoine-Santoni, B. Poggi, E. Vittori, H. V. Hieux, M. Delhom, and A. Aiello, "Smart Entity – How to build DEVS models from large amount of data and small amount of knowledge ?," in *Proceedings of 11th EAI International Conference on Simulation Tools and Techniques*, Chengdu, People's Republic of China, 2019.

T. Antoine-Santoni, B. Poggi, D. Federici, F.M. Manicacci, J.S. Gualtieri, and A. Aiello « Proposition of a smart environment architecture for resources monitoring and rural activities management”, in *Proceedings of The Thirteenth International Conference on Sensor Technologies and Applications*, Nice, France, October 2019.

### **Articles dans des conférences nationales avec comité de lecture**

B. Poggi, T. Antoine-Santoni, and J.-F. Santucci, "L'optimisation via la simulation : proposition d'une architecture nouvelle intégrant le formalisme DEVS," in *LES JOURNÉES DEVS FRANCOPHONES - THÉORIE ET APPLICATIONS*, Cargese, France, 2016.

T. Antoine-Santoni, B. Poggi, E. Vittori, H. Van Hieu, D. Araujo, et A. Aiello, Vers un système d'information pervasif pour un Smart Village. Evolution des SI : vers des SI Pervasifs ?, Université Paris 1 Panthéon-Sorbonne, Jun 2019, Paris, France. (hal-02152730)

### **Rapports techniques**

X. Silvani, T. Antoine-Santoni Conditions de certification du réseau de capteur sans fil Crossbow pour fonctionnement en Atmosphère Explosive (ATEX : Directive 1994 / 9 / CE) – Janvier 2010 – UMR CNRS SPE 6134

X. Silvani, F. Morandini, T. Antoine-Santoni, E. innocenti, A. Pieri, Détection et monitoring d'incendie par réseau de capteur sans fil. Application à la surveillance d'un environnement industriel de stockage de combustible liquide - Rapport final d'activité – Janvier 2013 – SaTT Sud Est - UMR CNRS SPE 6134

T. Antoine-Santoni, A. Paolini – Rapport d'activités du programme Smart Village – Smart Paesi 2017 – Décembre 2017 – UMR SPE 6134

T. Antoine-Santoni, A. Paolini – Rapport d'activités du programme Smart Village – Smart Paesi 2018 – Décembre 2018 – UMR CNRS SPE 6134



## MEMOIRE SCIENTIFIQUE

---

## Résumé

---

L'observation est souvent le préalable dans la constitution de la connaissance d'un système. La mesure de paramètres, la collecte d'informations ou l'observation de comportements ont pu être réalisés depuis des centaines d'années de manière manuelle ou semi-assistée par des chercheurs ou bien de simples curieux, avant l'arrivée de technologies nouvelles. Les réseaux de capteurs sans fil ont suscité depuis la fin des années 80 une attention particulière dans le cadre de recherche ou d'applications. Tout d'abord utilisés dans un contexte militaire, ils ont rapidement intégré les expérimentations dans le domaine scientifique grâce à la réduction de la taille des composants, les capacités accrues de calcul, les performances augmentées des communications sans fil et la chute des coûts. La possibilité de déployer rapidement des capteurs de manière intrusive dans l'environnement a permis d'imaginer de nouveaux types d'observations en faisant émerger de nouvelles thématiques de recherche : la qualité de la mesure, le routage de l'information à travers le réseau pour assurer une continuité de service, le partage efficace du média sans fil pour réduire la consommation énergétique, l'émergence et l'utilisation de nombreux standards de communication. Ces dispositifs connectés se sont développés et ont intégré le quotidien pour devenir quasiment invisibles et omniprésents, favorisant l'émergence de l'Internet des Objets. Associée à la popularisation des algorithmes liés à l'intelligence artificielle et à l'accessibilité à des séries de données gigantesques, est apparue la notion d'informatique pervasive ou d'intelligence ambiante, environnement intelligent dédié au développement de services et d'aide à la décision pour les hommes et leur environnement.

Ce document propose d'analyser un ensemble de contributions, de travaux dans la thématique du déploiement et du développement des réseaux de capteurs sans fil par le biais de modèles pour la simulation et l'optimisation de ces réseaux, des tests en situation expérimentale réelle dans le cadre de différents programmes de recherche liés à l'observation et au suivi de feu, de sites, d'êtres vivants marins ou terrestres. Nous verrons comment ces travaux ont fait évoluer les recherches préalables vers une appréhension d'un système plus large proposant une intelligence ambiante pour le suivi environnemental.

---

# Des réseaux de capteurs sans fil à l'intelligence ambiante dans le suivi environnemental

## Synthèse de travaux

---

### 1 Introduction

Le contexte environnemental actuel est soumis à de nombreux changements avec des phénomènes observés nouveaux, plus violents provoqués par le changement climatique selon les spécialistes. Certains rapports scientifiques précisent que les précédentes crises d'extinctions d'espèces ont été causées par des catastrophes naturelles. Mais celle que nous vivons aujourd'hui est vraisemblablement causée par les activités humaines, comme s'accordent à le dire les experts du domaine[1]. Les dégâts sur l'environnement sont d'ores et déjà importants et l'érosion de la biodiversité s'accélère année après année, au point que l'on estime que 50% des espèces présentes en Afrique auront disparues d'ici 2050. Cela aura évidemment un impact sur l'homme qui pourrait bien être la première espèce à causer sa propre extinction. Cette érosion est si rapide qu'il n'est maintenant plus envisageable d'employer des méthodes traditionnelles d'observations pour l'étude de l'environnement et du vivant. Il est devenu capital de développer des outils et des techniques permettant de comprendre son fonctionnement sur une période de temps très courte. Dans ce contexte, nous avons orienté nos travaux depuis quelques années sur le déploiement de nouveaux systèmes d'informations basés sur des dispositifs. Les observations peuvent être réalisées de différentes manières, selon différentes techniques, automatisées ou non. Mais nous pouvons constater que depuis plus d'une quinzaine d'années, le recours à des systèmes de captation utilisant des dispositifs électroniques, souvent automatisés, est de plus en plus courant.

La surveillance environnementale est un enjeu crucial dans le domaine scientifique. En effet, les informations disponibles sur un phénomène ou un animal sont parfois rares ou bien difficile à obtenir. Pour disposer de ces informations, cela demande de longues campagnes d'observation aux équipes de recherche avec parfois peu de résultats à la clef. Ces difficultés peuvent être amplifiées également par des situations où l'environnement est hostile à l'homme et ne lui permet pas de réaliser ses observations.

Pour autant et malgré les difficultés, ces observations et les mesures sont essentielles et déterminent notre représentation de la donnée, la qualité de l'information, la valeur des connaissances, notre niveau de compréhension. C'est ce qu'illustre la Figure 1 par l'escalier de la connaissance. En effet, nous pouvons comprendre comment les observations et les mesures prennent place dans ce chemin vers la construction de la connaissance.

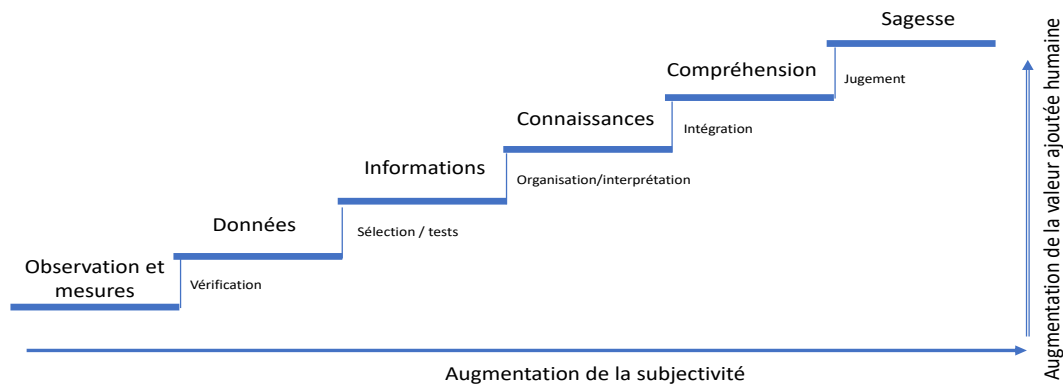


Figure 1 : Les escaliers de la connaissance [2]

Il est évident, au vu des connaissances actuelles, que l'informatique et la microélectronique jouent un rôle fondamental dans les observations et les mesures. Des dispositifs électroniques/physico-chimiques vont pouvoir réaliser des observations, faire des mesures qui seront qualifiées de données après vérification ; elles seront ensuite validées en tant qu'informations utilisables après des sélections et des tests. Le développement de ces techniques et technologies s'est accompagné, depuis une quinzaine d'années, de l'une des plus rapide transition technologique de ce début de siècle avec la démocratisation des domaines liés à l'intelligence artificielle. Cette transition rapide a été favorisée par l'accès à des bases de données immenses et la progression exponentielle des puissances de calcul avec l'émergence d'une nouvelle thématique scientifique sur l'informatique ubiquitaire ou d'intelligence ambiante.

Ce mémoire propose de naviguer dans le cheminement scientifique qui a permis de caractériser, dans un premier temps, les performances de réseaux de capteurs sans fil (RCSF) dans le suivi environnemental, en particulier dans la problématique du suivi des feux de forêt, par le biais de simulations de déploiement, de consommations énergétiques ou de tests en feu réel sur plateformes expérimentales. Nous verrons dans un second temps une approche d'optimisation générique appliqué au déploiement de RCSF et l'émergence d'une compétence scientifique dans le cadre de déploiement de ces réseaux avec une participation à différents programmes de surveillance environnementale ou animale. L'ensemble de ces travaux s'est intégré dans le développement d'une intelligence ambiante au service de le suivi environnemental.

## 2 Les réseaux de capteurs sans fil

Les capteurs lient le monde physique avec le monde digital en capturant et en relevant les phénomènes réels sous une forme qui permet de les traiter, de les stocker et d'interagir. Intégrés dans de nombreux dispositifs, dans les machines ou disséminés dans un environnement, ils fournissent des possibilités d'observation de plus en plus précises. En effet, dans de nombreux cas applicatifs, ils permettent de mesurer des phénomènes, d'observer des êtres vivants et d'aider à la compréhension en proposant une approche intrusive du milieu de mesure : les catastrophes naturelles, la préservation des ressources naturelles, l'amélioration de la sécurité et de la santé, le suivi de faunes sauvages, etc.

La popularisation des dispositifs utilisant des technologies sans fil, favorisée par la miniaturisation des composants, la diminution du coût de fabrication et d'achats, les capacités de communication et de calcul accrues, la rapidité de déploiement a permis d'offrir un nouveau panel d'outils scientifiques pour compléter et approfondir les observations.

Nous nous attacherons dans cette première partie, à vulgariser le domaine des réseaux de capteurs sans fil pour faciliter la lecture du document. Nous retracerons ensuite rapidement les travaux de thèse, en particulier dans le développement d'un simulateur de réseaux de capteurs sans fil. Puis nous présenterons les études menées dans la caractérisation des performances et le développement des réseaux de capteurs sans fil dans l'observation de phénomènes physiques et d'êtres vivants.

### 2.1 Éléments de définition

L'un des premiers systèmes de détection à distance développés fut le dispositif de surveillance sonore (SOSUS) de l'armée américaine durant la guerre froide, constitué de capteurs immergés. Stratégiquement positionné sur le fond des océans, il permettait de détecter les mouvements des sous-marins soviétiques. Ce système est actuellement utilisé par la National Geographic and Atmospheric Administration (NOAA) pour surveiller des mouvements dans les océans liés à l'activité terrestre ou animale. Historiquement, la recherche moderne sur les réseaux de capteurs a commencé dans les années 80 avec le programme sur les réseaux distribués de capteurs (Distributed Sensor Network : DSN) lancé par le département recherche du ministère de la défense américaine (DARPA). Durant le workshop DSN de 1978, les composants technologiques applicables au DSN ont été identifiés : les senseurs ou capteurs, les outils de communication, les techniques et algorithmes de traitement des données et les suites de logiciels distribués. Les chercheurs de l'Université de Carnegie Mellon (CMU) et de l'Institut de Technologie du Massachussets (MIT) ont poursuivi cet effort en travaillant sur des systèmes d'exploitation ou sur des techniques de traitement du signal. Les avancées

récentes qui ont conduit à augmenter la puissance de calcul et de communication, l'apparition de petites sondes performantes et peu coûteuses basées sur la combinaison des technologies des Micro Systèmes Électromécaniques (MEMS), ont permis le déploiement massif des réseaux ad hoc sans fil pour différentes applications. C'est au début des années 1990 que sont posées les bases de la problématique du regroupement de plusieurs microcapteurs sur une même puce par K.D. Wise [3]. L'étude s'est d'abord portée sur la compatibilité des procédés technologiques de fabrication des parties capteurs avec le traitement du signal. Quelques années plus tard, dans les années 2000, le lancement du projet " Smart Dust " par K. Pister [4] tente de réaliser un regroupement de microcapteurs sur une même puce. L'objectif est d'intégrer un système de traitement du signal et d'y ajouter un moyen de communication. Les thèmes abordés par cette nouvelle problématique sont de nature différente. Ils concernent principalement, du point de vue informatique, la gestion de l'énergie que consomme le système lors de son activité de calcul [5], l'intégration variée de microcapteurs pour la **détection et les moyens de communication et de transmission** de l'information.

**La détection** est une technique utilisée pour recueillir des données et des informations provenant d'objet physique ou de processus, c'est à dire les apparitions d'événements (des changements d'états comme l'augmentation de la température). Un objet qui est capable de réaliser cette tâche de détection est appelé capteur. Les capteurs représentent donc des dispositifs capables de recueillir des informations sans être forcément au contact de l'objet suivi. Ils traduisent les paramètres ou les évènements du monde physique en signaux mesurables et analysables. Cette phase de transduction, avec cette capacité de convertir l'énergie provenant du monde physique en une énergie électrique, peut ainsi être utilisée par des systèmes informatiques, comme illustré sur la Figure 2.



Figure 2 : Acquisition de données et actions [1]

Il est à noter que le processus représenté en Figure 2 ne contient pas obligatoirement la phase d'actionnement. En effet, la seule détection est souvent utilisée mais dans certaines conditions d'utilisation, il est nécessaire de déclencher une action suite à la détection d'un phénomène, d'un paramètre (ex. arrosage) pour contrôler le monde physique. Les capteurs peuvent être ainsi classifiés en fonction de la donnée mesurée ; les exemples et les types de capteurs sont nombreux comme illustré par le Tableau 2.

*Tableau 2 : Exemples de capteur*

Type de mesure physiques	Quelques exemples
Température	Thermocouple et thermistance
Pression	Manomètre, baromètre, jauge d'ionisation (vide)
Humidité	Hygromètre, capteur capacitif et résistif
Chimique	Capteur de PH, capteur électrochimique
Optique	Photodiode, phototransistor, capteurs infrarouge
Acoustique	Résonateur piézoélectrique, microphone
Mécanique	Jauge de déformation, capteur tactile, cellule piézo-résistive
Mouvement/ vibration	Accéléromètre, gyroscope
Courant	Anémomètre
Position	GPS, capteur ultra-sons
Électromagnétique	Magnétomètre, capteur à effet Hall
Radiation	Détecteur d'ionisation, compteur Geiger

Ces capteurs peuvent être considérés comme passifs, s'ils ne nécessitent pas de courant externe pour fonctionner, et actifs dans le cas contraire. Des capteurs qui peuvent travailler sur les données physiques ont amené la recherche à miniaturiser des ensembles de capteurs – processeur - support de communication pour créer des capteurs sans fil.

Un nœud d'un réseau de capteurs sans fil possède des capacités de calcul, de communication et de détection environnementale. Pour représenter les composants élémentaires d'un capteur, nous nous appuyons sur une représentation simplifiée de référence que nous fournis [6] sur la Figure 3.

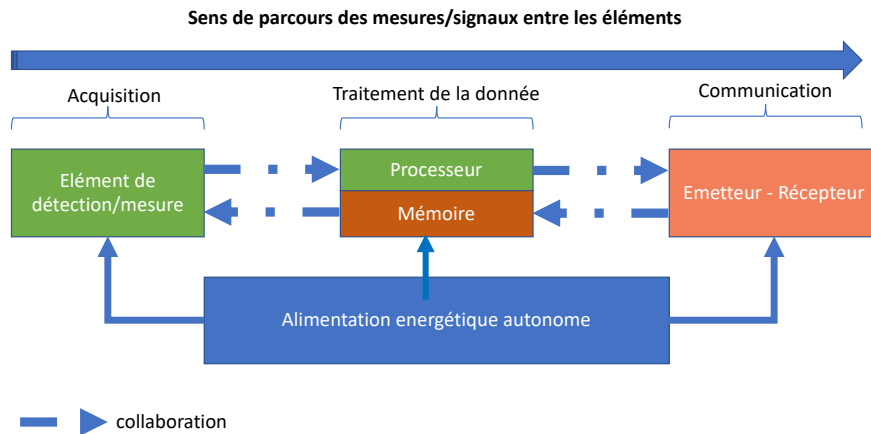


Figure 3 : Composant d'un capteur sans fil selon [6]

Il est possible de distinguer à partir de cette représentation, cinq principaux acteurs dans la composition d'un capteur sans fil :

1. une unité d'acquisition et de détection environnementale formée des différents capteurs, mais aussi d'autres éléments tels qu'un module GPS. Cette structure est généralement désignée par le terme panneau de sondes, "Sensorboard" ou platine de développement. La principale activité de cette unité est de capter et de mesurer les données physiques de l'environnement dans la zone de détection ;
2. un outil de traitement des données composé par le processeur et implicitement le système d'exploitation ou le code d'exécution embarqué. Ils jouent un rôle majeur dans la gestion des différents éléments du capteur ;
3. une unité de stockage (mémoire) intrinsèque au capteur ayant pour rôle de stocker ou d'agréger des informations avec un rôle essentiel dans la gestion des données, mais également dans la configuration architecturale et applicative du nœud ;
4. une unité d'émission/réception qui est constituée par l'association d'une antenne et des protocoles physiques des technologies sans fil. Plusieurs techniques existent pour permettre les échanges d'informations entre les capteurs : communication optique, infra-rouge et ondes radios. Dans le cas des ondes radios, qui est la technique la plus utilisée, il est possible de trouver plusieurs standards : la technologie WIFI, Bluetooth



et le standard Zigbee, le protocole LoRa, etc. Un survol des types de communications sera présenté dans la suite du document ;

5. une source d'énergie doit alimenter les différents composants du capteur. C'est un point sensible dans l'activité d'un nœud. La source d'énergie peut revêtir plusieurs formes : piles alcaline rechargeables ou non, batterie lithium ou énergies renouvelables.

**Un ensemble de nœuds** va pouvoir collaborer par le biais de médias de communication, de protocoles de partage du média (MAC), de protocoles de routage, pour transmettre des messages et ou bien interagir dans un ensemble qui s'appelle **un réseau de capteurs sans fil (RCSF)**.

Les RCSF disposent d'un potentiel important pour augmenter l'efficacité d'un système, son automatisation ou bien son contrôle. On les retrouve intégrés dans de nombreux objets du quotidien qui interagissent régulièrement par le biais de dispositifs connectés ou par le biais des *smartphone*, dans un vocable plus large, tout ce qu'on appelle l'Internet des Objets (IdO). L'IdO utilise les capteurs pour créer de la valeur d'usage à des objets qui apparaissaient inertes avant leur connectivité au réseau (montre, balance, réfrigérateur, etc.). Un réseau de capteurs sans fil est donc un ensemble de nœuds collaborant pour réaliser un certain nombre de tâches, en particulier la collecte d'informations et la remontée des données. Il utilise différentes technologies de communication sans fil pour faire cheminer les informations jusqu'à un puit/station de base/passerelle. Ces informations seront soit stockées localement, soit transmises par le réseau internet à une base de données distante. Ces données seront ensuite utilisables (analyse, stockage, fouille, traitement) par l'utilisateur final.

La remontée des informations est dépendante de plusieurs paramètres :

- de la topologie de déploiement du réseau (maille, étoile, *cluster*), de son organisation relative aux entités déployées et de la station de base ;
- des protocoles de partage du média sans fil (protocole Medium Access Control (MAC)) ;
- des protocoles de transmission et de cheminement de l'information (protocole de routage).

L'ensemble de ces paramètres va jouer un rôle important dans le déploiement des RCSF influençant la qualité de service de ces réseaux, la consommation énergétique et également le coût du dispositif.

**Le déploiement** des réseaux de capteurs sans fil dans le cadre du suivi de phénomènes environnementaux ou d'animaux est une phase importante dans la construction du réseau pour déterminer la transmission des informations et de manière générale les performances du réseau. En effet, le déploiement d'un RCSF peut-être dépendant de la situation (en extérieur ou à l'intérieur de

bâtiments), aléatoire ou déterminée. Il peut être également conduit par des forces virtuelles, des localisations pré-calculées, des schémas de déploiements hybrides, des déploiements de couverture, des déploiements en barrière, ou bien encore orienté vers une cible.

Le positionnement des nœuds d'un RCSF sera dépendant du lieu de déploiement, du matériel utilisé et du support de communication. Dans le cadre des déploiements des RCSF, le média de communication va être un élément déterminant dans la mise en place du dispositif. En effet, les caractéristiques de portée du signal et de consommation énergétique déterminent souvent la technologie de communication à utiliser. De nombreux standards de communication ont émergé et ont permis de créer une ontologie dans les types de réseaux. Comme précisé précédemment, l'IdO intègre des capteurs, et les technologies se confondent au niveau des applications, comme illustré au niveau de la Figure 4.

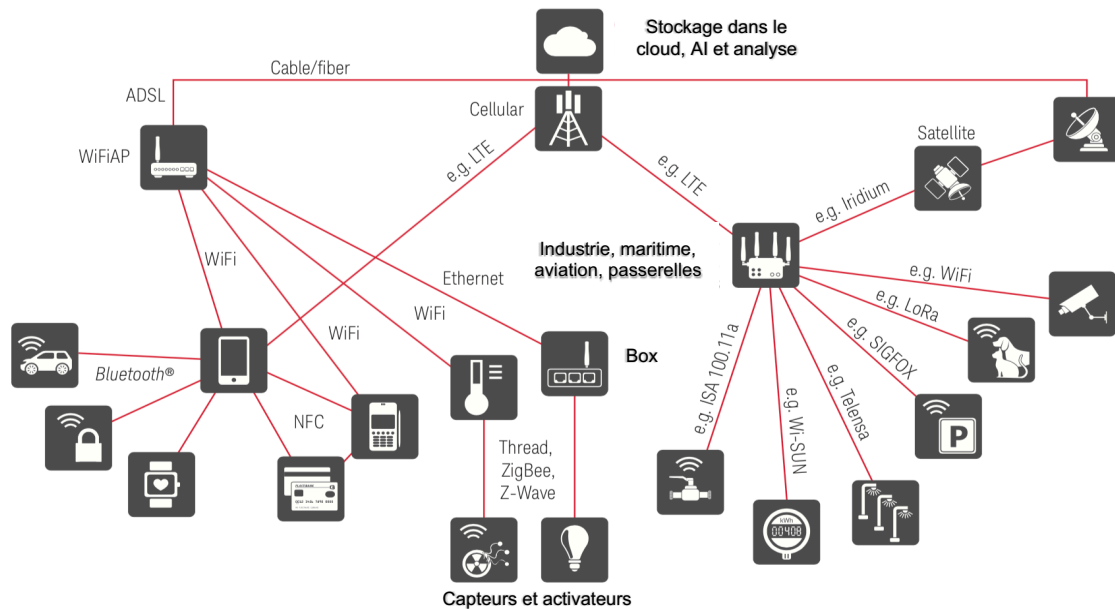


Figure 4 : Les technologies des RCSF ou IdO en 2018 (Keysight Technologies)

Les possibilités d'observation, de déploiement des RCSF ont ouvert des perspectives importantes dans de nombreuses applications. Cependant, avant le déploiement, la caractérisation des performances des RCSF est nécessaire pour disposer d'outils pertinents dans le cadre des mesures et des observations. La caractérisation peut se faire de deux manières :

- de manière virtuelle, en proposant des simulations à partir de modèles, de scénarios ;
- de manière réelle, en proposant des tests en laboratoire ou sur un site expérimental.

Nous nous attacherons dans la partie suivante, à synthétiser d'une part les contributions relatives à cette caractérisation de performances de RCSF selon un axe modélisation-simulation et d'autre part une partie de travaux orientés sur plateforme ou site expérimental. L'objectif premier des travaux qui seront présentés était de proposer la validation des RCSF dans le suivi environnemental.

## 2.2 Modélisation et simulation d'un RCSF (synthèse des travaux de thèse)

Cette partie ne vise pas à proposer des éléments de contribution relatifs au domaine de la modélisation et de la simulation. Les travaux réalisés permettent en revanche de présenter l'utilisation des concepts de la modélisation et de la simulation appliqués à la construction d'un modèle de réseaux de capteurs sans fil, dont l'objectif est la caractérisation de performances de ces dispositifs par le biais de simulations.

### 2.2.1 Aspects généraux de la modélisation et de la simulation

Le **système réel** définit une partie observée du monde réel [7]. Tout système réel peut être représenté sous la forme d'un modèle suite à une phase de modélisation. J. Popper définit comme le couple **modélisation - simulation** "*l'ensemble des activités qui consistent à mettre au point, construire, tester, valider, utiliser et analyser un modèle formel élaboré pour représenter les aspects d'un système retenus comme significatifs pour les objectifs de l'étude*"[8]. Selon le B.P. Zeigler, **la modélisation** est un processus permettant d'ordonner les connaissances d'un système souhaitant être observé. Un processus de modélisation et de simulation mettra en œuvre trois entités principales :

- le système (réel ou fictif) fournissant les données comportementales nécessaires à l'élaboration du modèle et à la vérification des résultats ;
- le modèle servant de support de raisonnement lors de l'étude ;
- le simulateur gérant le modèle afin de produire des données comportementales qui seront comparées aux informations du système.

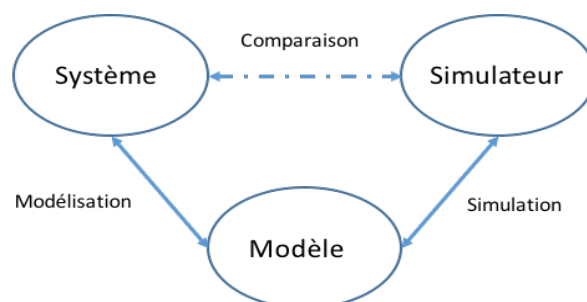


Figure 5 : Interaction Système - Modèle - Simulateur

Le **simulateur** représente l'échange d'instructions permettant la génération des résultats. La comparaison des résultats issus du simulateur et de ceux issus du système étudié va autoriser la validation du modèle, si les critères de formulation sont validés.

De par leur nature même de représentation d'un système, les modèles sont développés selon une perspective propre à leur **concepteur** et au domaine auxquels ils appartiennent. Cette perspective est en fait un mécanisme qui permet au concepteur de déterminer quelles sont les informations pertinentes à l'accomplissement de la modélisation qu'il est en train d'effectuer[9]. Le niveau d'abstraction d'un modèle est une notion corollaire et dépendante de la perspective qui détermine la quantité d'informations contenue dans celui-ci. Cette notion permet de ne considérer que les informations relatives à la modélisation, en considérant les abstractions comme un moyen de cacher sélectivement celles qui ne se révèlent pas indispensables. Un modèle décrit à un bas niveau d'abstraction contiendra plus d'informations qu'un modèle décrit à un niveau d'abstraction supérieur [10]. Le choix d'un niveau d'abstraction est une étape importante dans la conception d'un modèle et est le plus souvent effectué très tôt dans le processus de modélisation et de simulation. Cette représentation du système s'appuie sur un ensemble d'outils et de règles mathématiques permettant la spécification formelle d'un modèle, autrement dit un formalisme utile à la spécification abstraite d'un modèle. Le choix du formalisme est dépendant du système observé, comme illustré par la Figure 6.

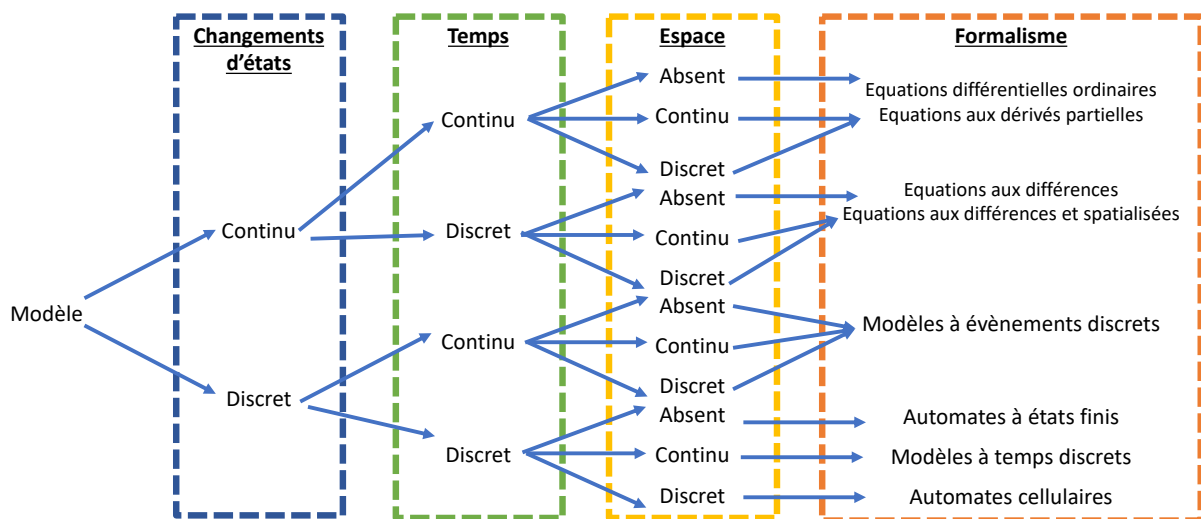


Figure 6 : Choix du formalisme en fonction de l'état, du temps, de l'espace selon [11]

Le choix du formalisme peut se faire selon un raisonnement progressif [11] en se référant à différents critères que sont les changements d'états, le temps, l'espace. Dans le cadre des travaux de recherche de modélisation et simulation menés dans UMR SPE Université di Corsica – CNRS SPE, et en particulier au sein de l'équipe SISU, notre réflexion s'appuie sur le formalisme à évènements discrets DEVS, issu

de la théorie des systèmes et décrit par B.P. Zeigler à la fin des années 70. Le formalisme DEVS permet la modélisation et la simulation de systèmes à événements discrets. Les systèmes modélisés peuvent être traduits selon une représentation graphique et hiérarchique sous forme de boîtes noires interconnectées et imbriquées, rendant la modélisation simplifiée. Il répond ainsi aux besoins de genericité, de compatibilité et de réutilisabilité. De nombreux travaux ont été menés sur ce formalisme, ayant permis le développement de nombreuses contributions dérivées ou de bibliothèques de modèles dans différents champs de recherche fondamentale ou appliquée. Toutes ces qualités ont permis au formalisme DEVS de s'imposer au sein de l'équipe d'informatique SISU (ex TIC) de l'Unité Mixte de Recherche CNRS SPE 6134 comme le support de modélisation des systèmes complexes depuis une vingtaine d'années.

### 2.2.2 Formalisme à événements discrets DEVS (*Discrete Event System Specification*)

Le formalisme DEVS se base sur une approche à deux éléments d'aide à la modélisation : le modèle atomique et le modèle couplé.

**Le modèle atomique (MA)** permet de décrire le comportement d'un phénomène, comme illustré sur la Figure 7, du système réel de manière modulaire et réutilisable. Son comportement dépend d'événements externes et internes provoquant des changements d'états et/ou des générations d'événements de sortie.

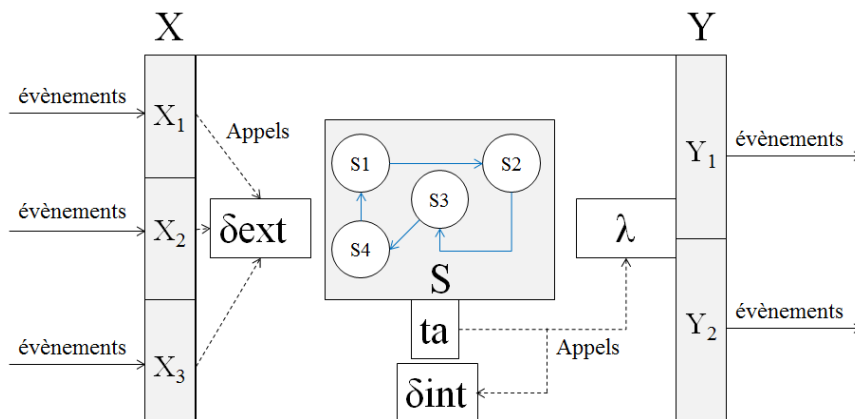


Figure 7 : Modèle atomique DEVS

Sa définition est la suivante :

$$\text{Modèle\_Atomique} = \langle X, Y, S, ta, \delta_{int}, \delta_{ext}, \lambda \rangle$$

- X désigne l'ensemble des ports d'entrée du modèle et les valeurs d'entrée admissibles sur chacun de ces ports.

- $Y$  désigne l'ensemble des ports de sortie du modèle et les valeurs de sortie admissibles sur chacun de ces ports.
- $S$  désigne l'ensemble des états possibles du modèle. L'état d'un modèle est composé au minimum d'une première valeur décrivant l'état initial du modèle et d'une seconde valeur décrivant la durée de cet état.
- $ta$  désigne la fonction d'avancement dans le temps du modèle. Elle peut être considérée comme l'horloge du modèle. C'est elle qui gère l'appel des fonctions de transitions internes et de sorties.
- $\delta_{int}$  désigne la fonction de transition interne. Celle-ci détermine le prochain état du modèle en fonction de son état courant. Elle est déclenchée lorsque le temps passé par un modèle dans un état (elapsed time) est supérieur ou égal à la valeur retournée par la fonction  $ta$ .
- $\delta_{ext}$  désigne la fonction de transition externe. Celle-ci est invoquée lors de la réception d'une valeur sur l'un des ports d'entrée  $X$ .
- $\lambda$  désigne la fonction de sortie. Celle-ci est appelée lorsque la durée d'un état est échu. Elle transmet alors les valeurs de sorties sur les ports de sorties  $Y$ . Son exécution terminée, la fonction  $\delta_{int}$  est appelée.

Pour déterminer la structure du modèle, **le modèle couplé (MC)** permet la définition d'un système de manière hiérarchique spécifiant les interactions entre les modèles entre eux, qui peuvent être atomiques ou couplés.

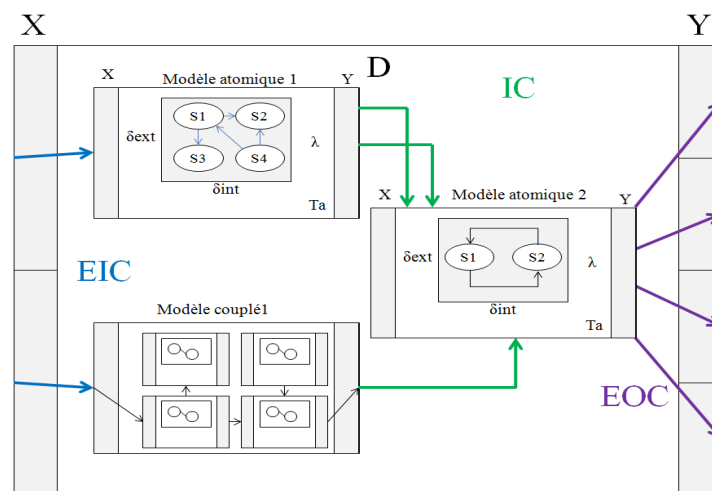


Figure 8 : Modèle couplé DEVS (avec 2 MA et 1 MC)

La définition d'un modèle couplé est décrite selon la Figure 8 de la manière suivante :

Modèle\_Couplé= < X, Y, D, EIC, EOC, IC, select >

- X : ensemble des ports d'entrée du modèle couplé (à l'exclusion des ports d'entrées des composants du modèle)
- Y : ensemble des ports de sortie du modèle couplé (à l'exclusion des ports de sorties des composants du modèle)
- D : liste des composants présents à l'intérieur du modèle couplé
- EIC : ensemble des branchements entre les ports d'entrée du modèle couplé et les ports d'entrée de ses composants.
- EOC : ensemble des branchements entre les ports de sortie du modèle couplé et les ports de sortie de ses composants.
- IC : ensemble des branchements entre les composants du modèle couplé. Chacun de ces branchements a pour origine un port de sortie du composant vers le port d'entrée d'un autre composant.
- Select : fonction de sélection. Celle-ci est utilisée en cas de conflits entre deux modèles qui souhaitent s'exécuter en même temps et définit, dans le cas précis, un ordre d'exécution. Elle se base pour cela sur une liste de priorités définissant l'ordre d'exécution des modèles.

L'interaction des modèles atomiques et modèles couplés va permettre au modélisateur de pouvoir définir différents niveaux d'abstraction de son modèle et de focaliser sa réflexion sur les parties du modèle qu'ils souhaitent affiner ou pas. L'un des avantages du formalisme DEVS est que le modélisateur n'a pas à se soucier de la partie simulation car il y a une séparation explicite entre la modélisation et la simulation. Le simulateur est généré de manière automatique en se basant sur la description des modèles comme expliqué dans la Figure 9.

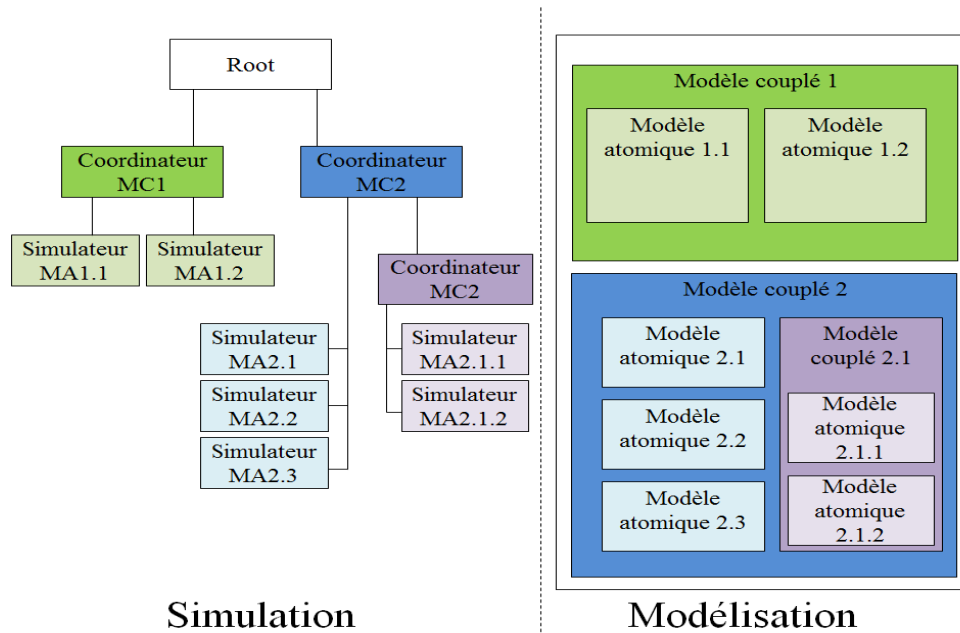


Figure 9 : Phase de simulation et phase de modélisation et concordance

A partir d'une décomposition hiérarchique des modèles, une arborescence de processus est réalisée. Deux types de processus sont ainsi isolés, avec d'un côté, les simulateurs liés aux modèles atomiques, et de l'autre, les coordinateurs pour contrôler la structure agencée par les modèles couplés.

### 2.2.3 DEVS-WSN : librairie de modèles DEVS pour les RCSF

Dans le cadre de nos recherches sur les RCSF pour la surveillance environnementale, en particulier de phénomènes comme le feu de forêt, il était nécessaire de passer par une étape de simulation de réseaux pour étudier les problématiques afférents à ce type de système. L'étude de différents simulateurs de RCSF [12] illustré par le Tableau 3, nous a conduit à développer un modèle pour répondre aux problématiques suivantes :

- la modularité du modèle, dans le sens d'une décomposition en sous-modèle ;
- la généricité du modèle, pour que ce modèle soit indépendant du matériel, sans tenir compte des particularités d'un constructeur ;
- la personnalisation du modèle, c'est à dire la possibilité de travailler par exemple, sur différents scénarios de routage de l'information ;
- la prise en compte de l'environnement : la possibilité de générer de scénarios environnementaux, comme le cas d'un feu de forêt ;
- la prise en compte de la topologie, c'est-à-dire de reproduire des schémas d'interaction dans le cadre du déploiement d'un réseau par le biais des possibilités de communication.



Tableau 3 : Comparaison des simulateurs de RCSF

	Matériels	Personnalisation	Modularité	Généricité	Environnement	Topologie	Energie
TOSSIM/PowerTossim	++	-	-	--	-	--	+
SensorSim	-	+	+	+	-	+	+
SENS	-	+	++	++	+	floue	-
SWAN	-	+	--	--	+	-	--
Glonemo	+	-	-	-	++	-	--
ATEMU	-	-	++	--	-	-	--
Avrora	+	-	-	-	-	-	++

Il nous semblait nécessaire de développer un modèle capable de prendre en compte ces différences problématiques [13][14][15][16], comme illustré sur la Figure 10. Un ensemble de modèles permet de modéliser le comportement d'un capteur sans fil selon la définition des composants d'un nœud de RCSF :

- des modèles atomiques (Communication (COM), Batterie (Battery), Mémoire (memory), carte d'acquisition (Sensorboard) et environnement (Env))
- et un modèle couplé pour définir des actions de routage et la gestion de l'information (Process) à l'intérieur d'un nœud de réseau de capteurs sans fil.

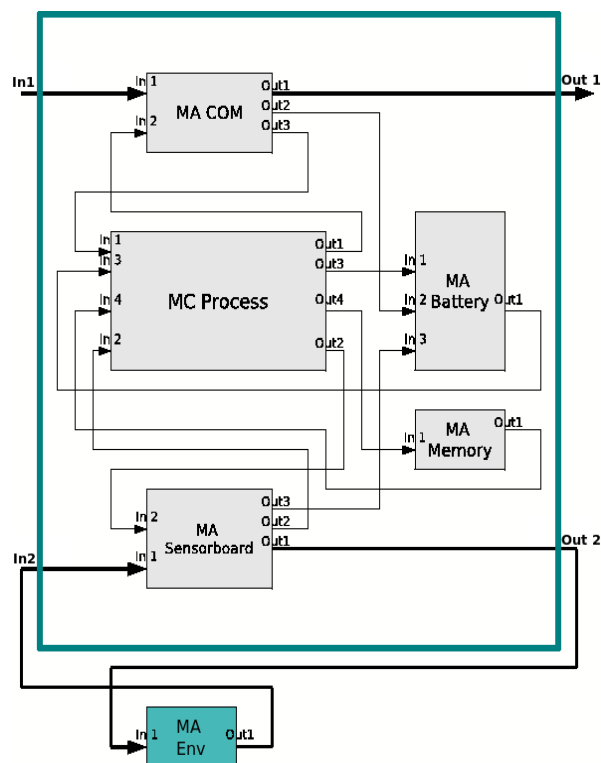


Figure 10 : Modèle Couplé Sensor de représentation d'un nœud de RCSF

Ce modèle de nœud d'un RSCF est constitué des sur les composants de base d'un capteur sans fil. Son approche modulaire et la volonté de construire un modèle générique autorisent des simulations selon différents aspects :

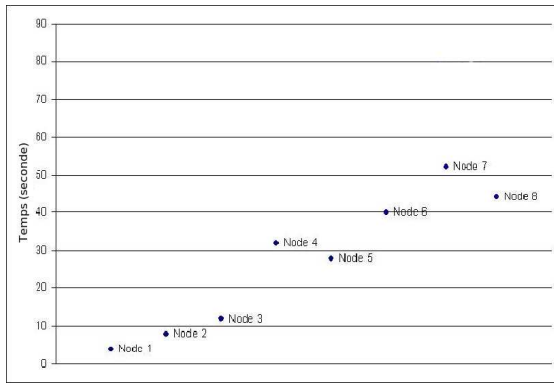
- pouvoir simuler un nœud et un réseau selon différents scénarios environnementaux ;
- pouvoir simuler un réseau selon différents protocoles de routage et les comparer ;
- pouvoir simuler un nœud et un réseau selon différentes contraintes énergétiques.

Un ensemble de bibliothèques a été implémenté, intégrant le modèle couplé *Sensor*, dans un ensemble appelé DEVS-WSN [17]. DEVS-WSN propose un simulateur en python de modèles DEVS intégrant différentes bibliothèques :

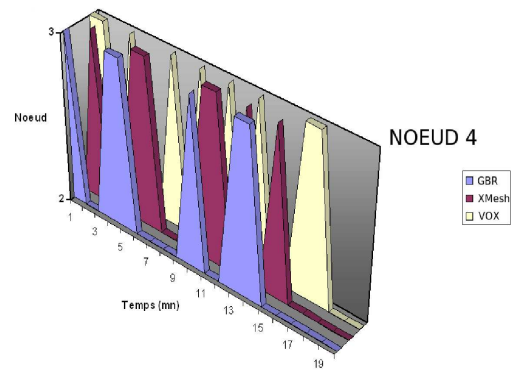
- la bibliothèque *WirelessSensorNetwork\_Specifications* est la base de l'architecture de simulation. En effet, elle se base sur une classe principale *WSNSimulator\_pattern*, héritant de la classe des modèles couplés, ayant pour rôle de proposer l'architecture du réseau à simuler.
- la bibliothèque *Components* fait référence aux éléments qui constituent la structure d'un nœud du réseau, comme on peut le voir sur la Figure 10 ;
- la bibliothèque *Tools* est proposée en particulier pour définir les éléments nécessaires à la création des scénarios différents lors des simulations.

#### 2.2.4 Résultats obtenus dans la simulation de RSCF à l'aide de la bibliothèque DEVS-WSN

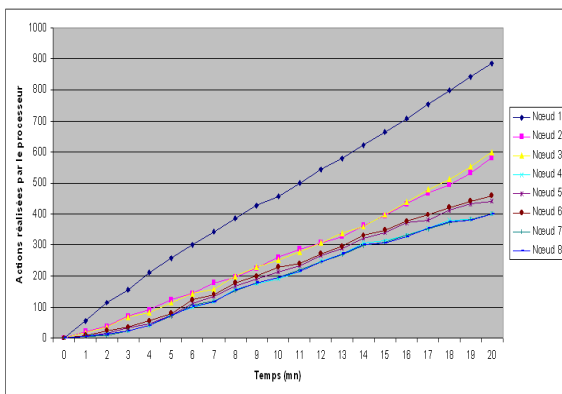
Le simulateur doit nous permettre de valider l'utilisation des RSCF dans le suivi environnemental et donc nous autoriser à analyser les performances du réseau : temps de cheminement d'un message d'un nœud vers la passerelle, influence des différents protocoles (MAC ou routage) sur le temps de cheminement, consommation énergétique des nœuds en activité dans le cadre d'un déploiement de longue durée. Notre approche est générique de manière générale, mais nous avons dû construire notre modèle et le comparer selon des performances réelles de capteurs MicaZ de la société MemSic (anciennement Crossbow), que nous verrons plus loin dans ce document.



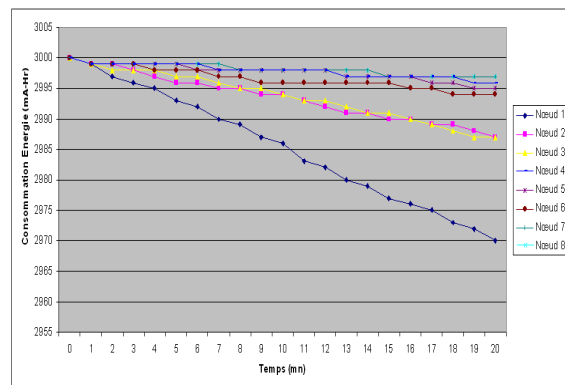
a) temps d'arrivée des messages vers la station de base (TOA)



b) Tests de performances selon différents protocoles de routage



c) Nombre d'opérations traitées par le MA Processor au cours des simulations



d) Consommation énergétique par Nœud du réseau

Figure 11 : Types de résultats proposés par DEVS-WSN

La définition du réseau, soumis à la simulation, a mis en concurrence des nœuds pour étudier les protocoles de routage sur la base d'un réseau à 8 nœuds[12]. Ce schéma est défini de manière déterministe car la librairie n'a pas été pensée, dans un premier temps, pour un déploiement aléatoire des nœuds. DEVS-WSN permet d'avoir accès à un certain nombre de résultats, illustrés par la Figure 11, pour analyser de nombreux paramètres propres, des performances aux réseaux de capteurs sans fil. Le temps d'arrivée des messages (TOA) illustré par le **Erreur ! Source du renvoi introuvable.** a) qui permet de distinguer les phases de diffusion, de réception des messages sur la station de base lors des processus de communication du réseau. Elle nous permet également de pouvoir avoir accès à des données relatives à des activités de routage qui nous informent de la fréquence de mise à jour des tables de routage de réseau lors des simulations. Nous pouvons obtenir des éléments qui permettent de faire également des comparaisons sur l'activité du réseau simulé, en particulier sur les nombres d'actions traitées par le MA Processor et sur la consommation énergétique. Ces résultats ont permis

de valider notre modèle pour aborder la question de la simulation de la réaction d'un RCSF dans la surveillance d'un phénomène, en particulier le feu de forêt.

#### 2.2.5 Résultats dans la simulation de scénarios de feu de forêts

Les RCSF représentent un potentiel important dans la possibilité de surveiller et étudier des phénomènes à distance et de manière intrusive. L'UMR CNRS - Université de Corse 6134 SPE développe des recherches au niveau du projet Feu depuis une vingtaine d'années, et dans ce cadre, nous avons évalué par le biais de simulation, le possible déploiement de réseaux de capteurs sans fil dans un feu.

Différentes hypothèses devaient être validés :

- Les RCSF, dans un contexte de déploiement déterministe, sont impactés par les protocoles de routage dans le souhait d'une remontée rapide de l'information dans le cadre d'un feu de forêt.
- La stratégie de déploiement d'un RCSF est déterminante dans la résilience du dispositif dans un contexte d'un feu de forêt pour assurer une continuité de service.

Dans le cadre de cette étude, des déploiements d'un réseau de capteurs par la librairie DEVS-WSN ont été proposés avec des scénarios de feu injectés par le biais du MA *Env*[18] comme représenté sur la Figure 12. Dans le cadre de nos simulations, deux paramètres de comparaison ont été proposés :

- **Alerte** : le temps où le premier événement feu est déclenché et le temps où le message arrive sur la station de base ; il détermine la capacité d'un réseau à être efficace dans la détection d'un feu de forêt.
- La **complexité de déploiement** est un paramètre qui va déterminer la structure, l'organisation du réseau dans son déploiement et la résilience du système face à un phénomène destructeur tel que le feu. Le déploiement en grille est simple car le nombre de relations est connu entre les nœuds selon un schéma défini. Un déploiement en « cercle » influe sur la vision générale du réseau, en particulier les relations entre les nœuds et la multiplication des passerelles.

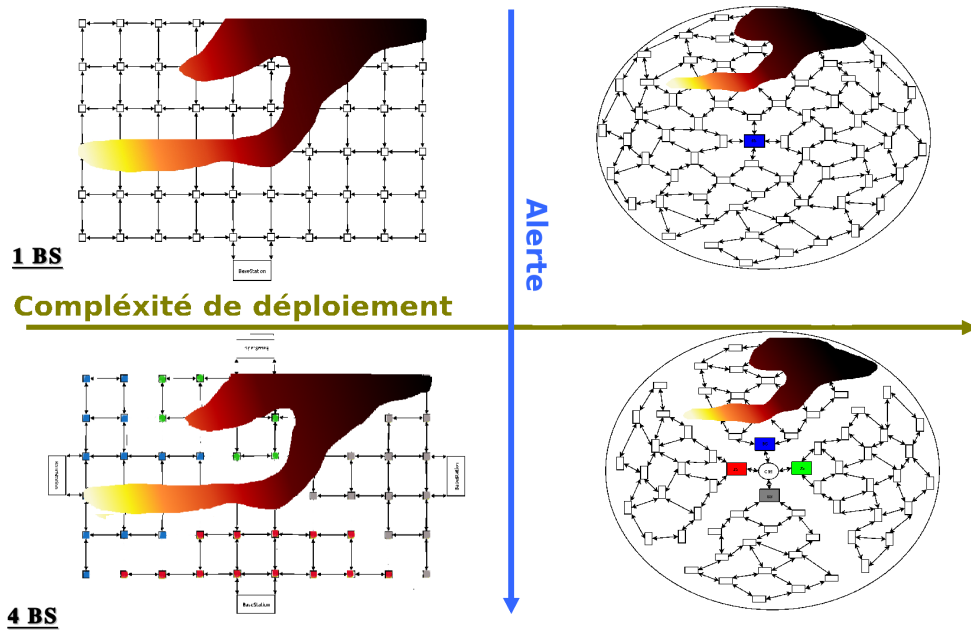


Figure 12 : Classification des résultats de simulation d'un déploiement déterministe dans le cadre de scénario de feu

Différents scénarios ont été simulé et ont donc permis la classification selon la Figure 12 Figure 12. Nous pouvons voir, en haut à gauche, une classification selon un déploiement simple avec une passerelle en grille, et en bas à droite, le cas le plus complexe avec une *clusterisation* des stations de base en cercle. Le temps d'arrivée des messages est réduit en mode *cluster* (permettant de favoriser un système d'alerte incendie). Ces études nous ont permis de valider un certain nombre de résultats selon les hypothèses précédemment établies :

- Le déploiement d'un réseau de capteurs sans fil pour surveiller un phénomène rapide comme le feu de forêt doit prendre en compte la notion de TOA des messages. Un réseau d'une dizaine d'entités provoque des engorgements et des décalages dans le suivi du phénomène.
- Il est préférable de créer des sous-réseaux (tendance à la « clusterisation ») favorisant une remontée de l'informations plus rapide (TOA).
- Les choix des protocoles de routage et du partage du média (protocole MAC) sont importants dans le cadre du suivi d'un phénomène particulier et l'on peut considérer que ce choix est application - dépendant.

L'approche sur le déploiement que nous avons proposée dans ces travaux de thèse était trop statique, trop déterministe. Elle nécessitait donc une évolution vers un processus d'optimisation d'un déploiement de réseau de capteurs sans fil à partir d'un déploiement aléatoire.

### 2.3 Contributions à l'optimisation du déploiement des RCSF

Les travaux menés dans le cadre de l'optimisation par la simulation sont issus de la réflexion sur le déploiement des réseaux de capteurs sans fil et se sont déroulés dans le cadre de la thèse de Monsieur Bastien Poggi. L'objectif était de venir alimenter le formalisme DEVS par une nouvelle librairie de modèles liée à l'optimisation. Cette démarche devait permettre d'une part, de développer l'optimisation spatiale et temporelle (possibilité de lier à une valeur, un temps et une position) des modèles DEVS existants et d'autre part, d'améliorer les performances des processus d'optimisation (qualité des solutions proposées, temps de calcul). L'approche générique voulue devait venir s'appliquer à la problématique du déploiement de RCSF.

Il existe de nombreuses méthodes d'optimisation, mais une classification peut être proposée selon deux axes : les méthodes exactes et les méthodes approximatives. Les méthodes exactes sont proposées pour des problèmes de nature linéaire et continue pouvant être modélisés aisément, en citant les méthodes de programmation linéaire et les méthodes de descente de gradient. La seconde catégorie agrège les méthodes approximatives (également appelées méthodes « probabilistes »). Parmi ces méthodes, les algorithmes génétiques, le recuit simulé et les essaims particules sont les plus fréquemment utilisés. Les méthodes d'optimisation, aussi appelées métaheuristiques, s'appuient sur des raisonnements probabilistes et aléatoires permettant la résolution de problèmes pour lesquels les méthodes d'optimisation dites classiques sont considérées comme trop gourmandes en ressources.

Dans le cadre de la réflexion sur l'optimisation, une approche générique a été proposée pour la mise en œuvre d'une méthodologie d'Optimisation Via la Simulation(OvS). Cette méthodologie intègre la notion de métaheuristiques au sein du formalisme DEVS. Les métaheuristiques agrègent de nombreux algorithmes s'inspirant de différents processus (biologique, physique, sociologique, etc.) pour résoudre des problèmes complexes. Bien que de très nombreux algorithmes soient présents dans la littérature, ceux-ci reposent tous sur un socle commun, décomposable en quatre catégories d'actions: des générations aléatoires de solutions, des évaluations, des analyses, des mises à jour, comme illustré sur la Figure 13.

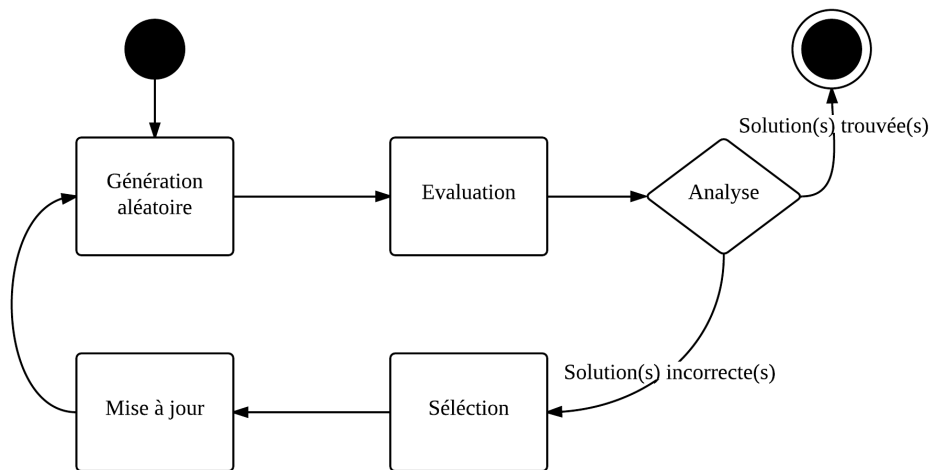


Figure 13 : Les étapes d'exécution d'une métaheuristique

Les phases se décomposent de la manière suivante :

- la phase de génération aléatoire d'une ou plusieurs solutions : l'objectif étant de diversifier les espaces de recherche de solutions.
- la phase d'évaluation basée sur une fonction d'évaluation permettant de définir pour chacune des solutions potentielles, la qualité de la réponse proposée par rapport au problème étudié ;
- la phase d'analyse permettant d'observer les résultats associés à la phase d'évaluation pour chacune des solutions. Nous pouvons recenser 3 cas dans cette phase : interruption (nombre d'itérations trop important face à un seuil défini), interruption si une solution convenable est trouvée, ou itération en se dirigeant vers l'étape sélection.
- la phase de sélection permet de guider le processus d'intensification ; une mise en concurrence des solutions est proposée, permettant d'orienter le choix entre les solutions à conserver et supprimer selon la phase d'évaluation. Cette sélection peut se faire de manière probabiliste ou déterministe.
- la phase de mise à jour : elle permet la modification des solutions existantes en vue de les améliorer ou la création de nouvelles solutions (avec suppression des anciennes).

L'approche proposée vise à définir une nouvelle architecture d'optimisation par la simulation «orientée modèle», intégrant les métaheuristiques sous la forme de modèles DEVS simulés.

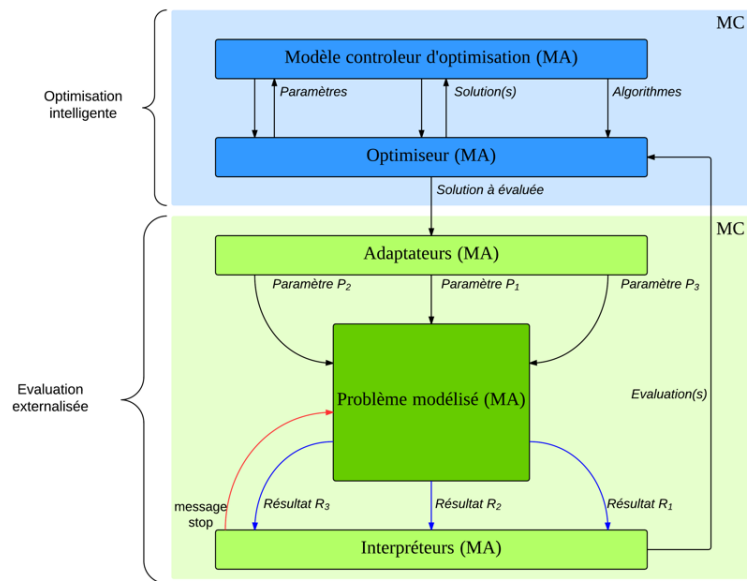


Figure 14 : Architecture DEVS du processus d'optimisation proposée par B. Poggi

Selon la Figure 14, l'architecture globale est constituée de deux parties : l'optimisation intelligente et l'évaluation externalisée.

L'optimisation intelligente propose une optimisation paramétrique d'un système à améliorer sur la base de deux modèles : le contrôleur et l'optimiseur. **Le modèle contrôleur** permet la génération d'algorithmes d'optimisation (selon des libraires de fonctions prédéfinies), de paramètres associés et de solutions aléatoires. **Le modèle optimiseur** intègre une évaluation et une mise à jour des solutions proposées. Le contrôleur d'optimisation permet de piloter l'optimiseur lors la résolution simulée du problème.

Les échanges entre ces deux modèles permettent au comportement du modèle optimiseur de **s'adapter** de manière dynamique au **problème étudié**. L'objectif est de permettre une convergence des solutions vers un optimum dans la solution. Pour cela, il peut réaliser trois types d'échanges contenant : des algorithmes d'optimisation, le paramétrage de ces algorithmes et enfin des solutions générées de manière aléatoire. À partir de ces différentes informations, l'optimiseur va être instancié lors de l'initialisation de la simulation et va démarrer sa première itération en externalisant une par une les différentes solutions vers le modèle représentant le problème, qui sera lui aussi simulé. D'après les résultats de l'ensemble des sorties produites par le modèle du problème, l'optimiseur attribue à chacune des solutions potentielles une évaluation. Cette évaluation critériée sera utilisée par l'algorithme d'optimisation afin de guider le processus d'intensification d'indentification des solutions optimales.



L'**évaluation externalisée** permet le couplage rapide d'un modèle à étudier dans un contexte d'optimisation. Elle est composée de différents adaptateurs d'entrée et différents interpréteurs de sortie regroupés au sein d'une librairie. L'évaluation externalisée permet de réaliser l'évaluation d'une solution proposée sur un modèle DEVS, représentant le problème à optimiser. Pour autoriser le processus d'optimisation, les adaptateurs permettent la traduction de solutions vers les ports d'entrée du modèle représentant le problème étudié. Différents adaptateurs ont été proposés pour répondre aux différentes problématiques des modèles DEVS développés au sein du laboratoire : classiques (traitement de valeurs numériques), temporisés, spatialisés, temporisés-spatialisés. Les interpréteurs traitent des sorties de simulation en direction du modèle d'optimisation, et permettent ainsi au modèle de produire des résultats interprétables par l'optimisation intelligente.

L'une des problématiques, évoquée précédemment dans le modèle DEVS-WSN, était la visualisation du déploiement ou plus précisément, la connaissance du déploiement optimal pour réduire des contraintes de temps, de couverture spatiale dans le cadre d'une expérimentation de suivi environnemental à l'aide de réseaux de capteurs sans fil. L'objectif est la maximisation de la surface couverte par un RCSF en utilisant un nombre minimum de nœuds. La librairie DEVS-WSN, comme cela a été exposé, ne propose qu'un outil de simulation d'un déploiement fixe. Nous avons complété notre approche par des modèle DEVS de gestion du déploiement du réseau.

Un modèle atomique DEVS de couverture de réseau a été proposé, illustré par la Figure 15. L'objectif est de définir une zone, un rayon de captation d'un phénomène par un détecteur physique. En effet, ce paramètre est un des éléments importants, abordé dans la partie expérimentation en feu réel (cf 2.4), que nous devons prendre en compte pour préciser notre approche initiale. Cette capacité de détection va déterminer en partie la couverture de dispositifs pour détecter un phénomène dans une zone. Ce MA DEVS Couverture intègre un port d'entrée collectant un ensemble de coordonnées géographiques de nœuds déployés et cinq sorties :

- la surface de détection couverte en  $m^2$  par le RCSF,
- la surface de détection non-couverte par le RCSF, -
- le pourcentage de couverture par le RCSF de la zone à surveiller,
- le pourcentage de zone non-couverte,
- la variance qui exprime le niveau de dispersion des nœuds sur la zone.

Il est à préciser ici que seule la représentation de la zone couverte par un nœud du réseau est sphérique, dans le souhait d'une simplification du cas d'étude.

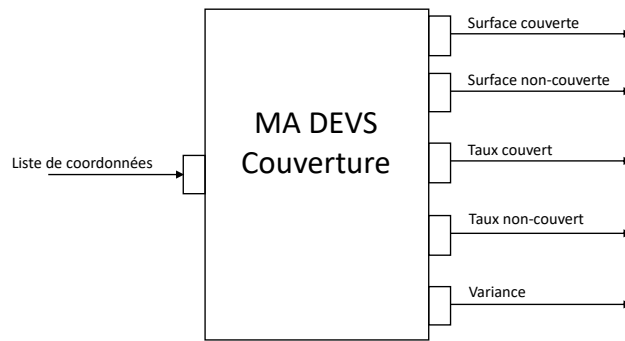
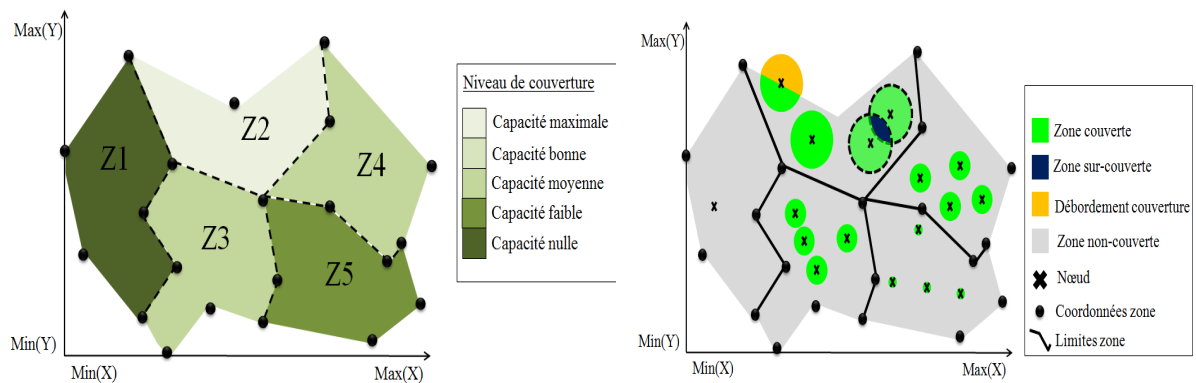


Figure 15 : Modèle atomique DEVS de couverture d'un réseau de capteurs sans fil

Le MA DEVS Couverture proposé sur la Figure 15 est paramétré selon une notion de potentiel de détection des capteurs. En effet, pour représenter au mieux une zone de déploiement, le modèle associe à un polygone un taux d'atténuation de la portée de détection physique d'un phénomène («capacité maximale de détection» (aucune atténuation), «capacité bonne» (atténuation de 20%), «capacité moyenne» (atténuation de 50%), «capacité faible» (atténuation de 80%) et enfin «capacité nulle» (atténuation totale)) comme illustré sur la Figure 16 a). Cette atténuation peut être issue de différents facteurs (densité de la végétation, différence du milieu, paramètres constructeurs ou défaillance technique, obstacles etc.) qui impactent un déploiement de réseau en milieu naturel.



a) Représentation d'une zone de déploiement

b) Exemple de déploiement aléatoire

Figure 16 : Sous-zones a) et atténuation du signal b)

Les capteurs déployés dans ces zones ont ainsi un rayon de captation attribué automatiquement en fonction de la sous-zone définie par le modélisateur.

Pour compléter notre approche, nous prenons en compte la capacité de maillage des nœuds d'un RCSF appelé ici connectivité. Nous avons proposé un MA DEVS Connectivité, illustré par la Figure 17, se basant sur une distance de portée de signal spécifiée par l'utilisateur. Cette distance est nécessaire

pour ajuster le comportement de notre modèle en fonction des standards de communication qui ont des portées différentes (Zigbee, LoRa, WiFi, Bluetooth, etc.). Comme dans le Modèle DEVS Couverture, une série de coordonnées géographiques est proposée en entrée, permettant la génération de six types de résultats répartis en deux grandes catégories : la qualité de la connectivité et la qualité de voisinage, avec chacun une valeur maximale, une valeur moyenne et une valeur minimale.

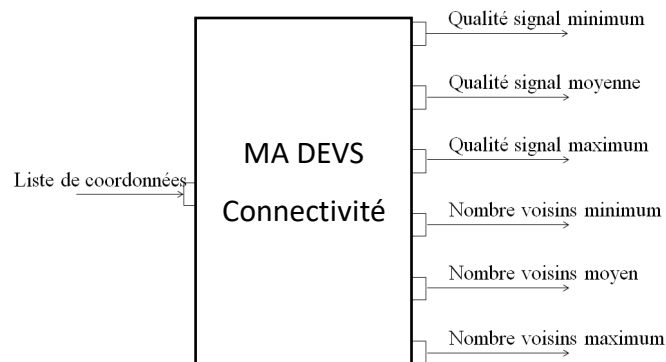


Figure 17 : MA DEVS Connectivité

Nous définissons un ensemble de fonctions intégrées, identifiées dans le Tableau 4, aux modèles MA Couverture et MA Connectivité qui vont permettre de fournir les valeurs de sorties. Dans les scénarios de simulation illustrés par les Figure 18, Figure 19, Figure 20, l'objectif était de définir une optimisation d'un déploiement aléatoire dans une zone définie par un utilisateur selon des conditions qu'il souhaite voir représentées lors de ces simulations. Les résultats fournissent un déploiement optimisé d'un réseau de capteurs sans fil en fonction de la zone déployée, des contraintes de déploiement choisies (ou identifiées) et la meilleure connectivité proposée dans le cadre de l'observation d'un phénomène. Cela représente une aide supplémentaire visant à déployer efficacement un RCSF dans le cadre de surveillance environnementale.

<b>MA Couverture</b>	<b>MA Connectivité</b>
<p align="center"><b>Surface couverte</b></p> $SC \leftarrow \bigcup_{i=1}^n f(S_i) \times g(S_i) \cap ZD$ <p>SC : Surface couverte</p> <p>f(S<sub>i</sub>) : Portée du capteur i</p> <p>g(s<sub>i</sub>) : Taux atténuation de la portée du capteur i</p> <p>ZD : Zone de déploiement</p> <p>n : Nombre de capteurs</p>	<p align="center"><b>Qualité du signal minimum</b></p> $\min_n(S)$ <p>S : vecteur des qualités de signal entre les différents nœuds</p> <p>n : nombre d'interconnexions entre les différents nœuds</p>
<p align="center"><b>Taux de couverture :</b></p> $TC \leftarrow SC \times 100 \div ST$ <p>TC : Taux de couverture ST : Surface totale SC : Surface couverte</p>	<p align="center"><b>Qualité du signal moyenne</b></p> $\frac{\sum_{i=0}^n S_i}{n}$ <p>S : vecteur des qualités de signal entre les différents nœuds</p> <p>n : nombre d'interconnexions entre les différents nœuds</p>
<p align="center"><b>Surface non couverte :</b></p> $SNC \leftarrow ST - SC$ <p>SNC : Surface Non Couverte ST : Surface totale SC : Surface Couverte</p>	<p align="center"><b>Qualité du signal maximum</b></p> $\max_n(S_i)$ <p>S : vecteur des qualités de signal entre les différents nœuds</p> <p>n : nombre d'interconnexions entre les différents nœuds</p>
<p align="center"><b>Taux de non-couverture</b></p> $TNC \leftarrow SNC \times 100 \div ST$ <p>TNC : Taux de non-couverture ST : Surface totale SNC : Surface non-couverte</p>	<p align="center"><b>Nombre de voisins minimum</b></p> $\min_n(\text{neighborhood}(N))$ <p>N : vecteur des nombres de voisins pour les différents nœuds</p> <p>n : nombre de nœuds du réseau</p>
<p align="center"><b>Répartition :</b></p> $\sum_{i=1}^n (\alpha - \beta)^2$ <p>n : nombre de sous zones</p> <p>α : le nombre de nœuds sans la sous-zone i</p> <p>β : le nombre moyen de nœud par sous-zone i</p>	<p align="center"><b>Nombre de voisins moyen</b></p> $\frac{\sum_{i=0}^n \text{neighborhood}(N_i)}{n}$ <p>N : vecteur des nombres de voisins pour les différents nœuds</p> <p>n : nombre de nœuds du réseau</p>
	<p align="center"><b>Nombre de voisins maximum</b></p> $\max_n(\text{neighborhood}(N))$ <p>N : vecteur des nombres de voisins pour les différents nœuds</p> <p>n : nombre de nœuds du réseau</p>

Tableau 4 : Fonctions intégrées aux MA Couverture et MA Connectivité

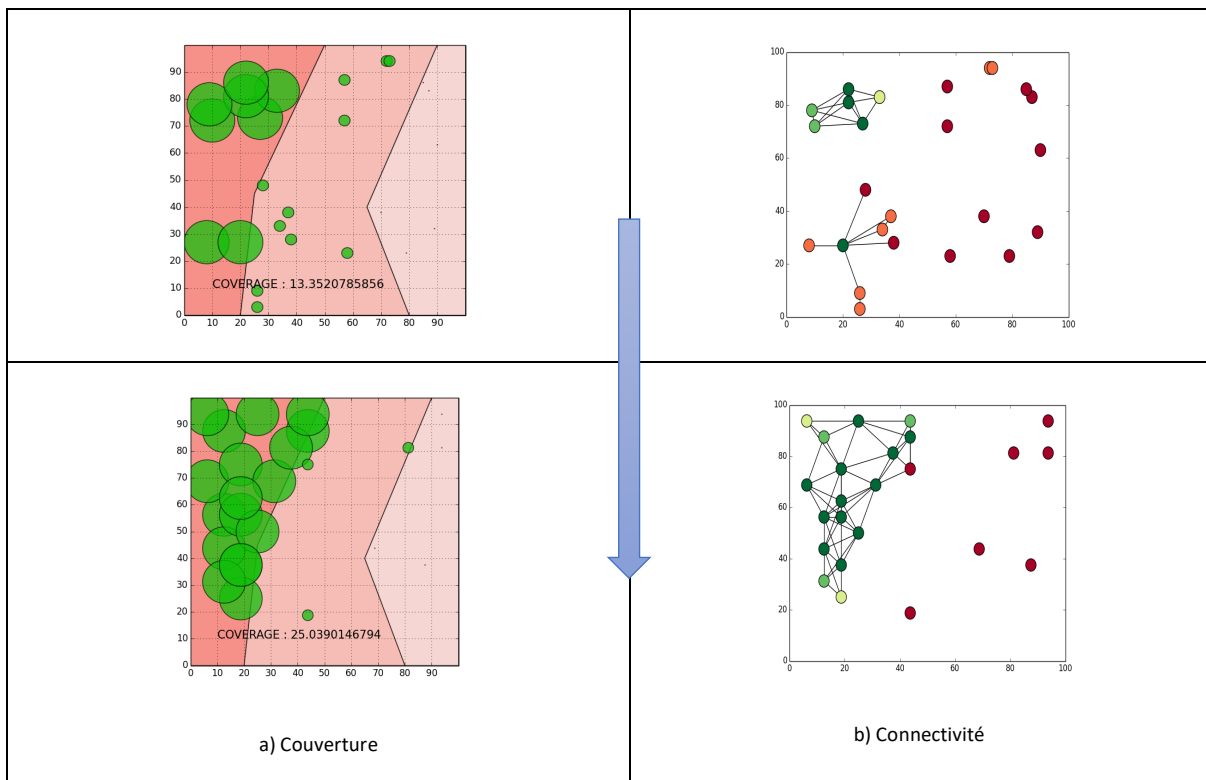


Figure 18 : Exemple d'optimisation de déploiement en zone avec atténuation de signal (1)

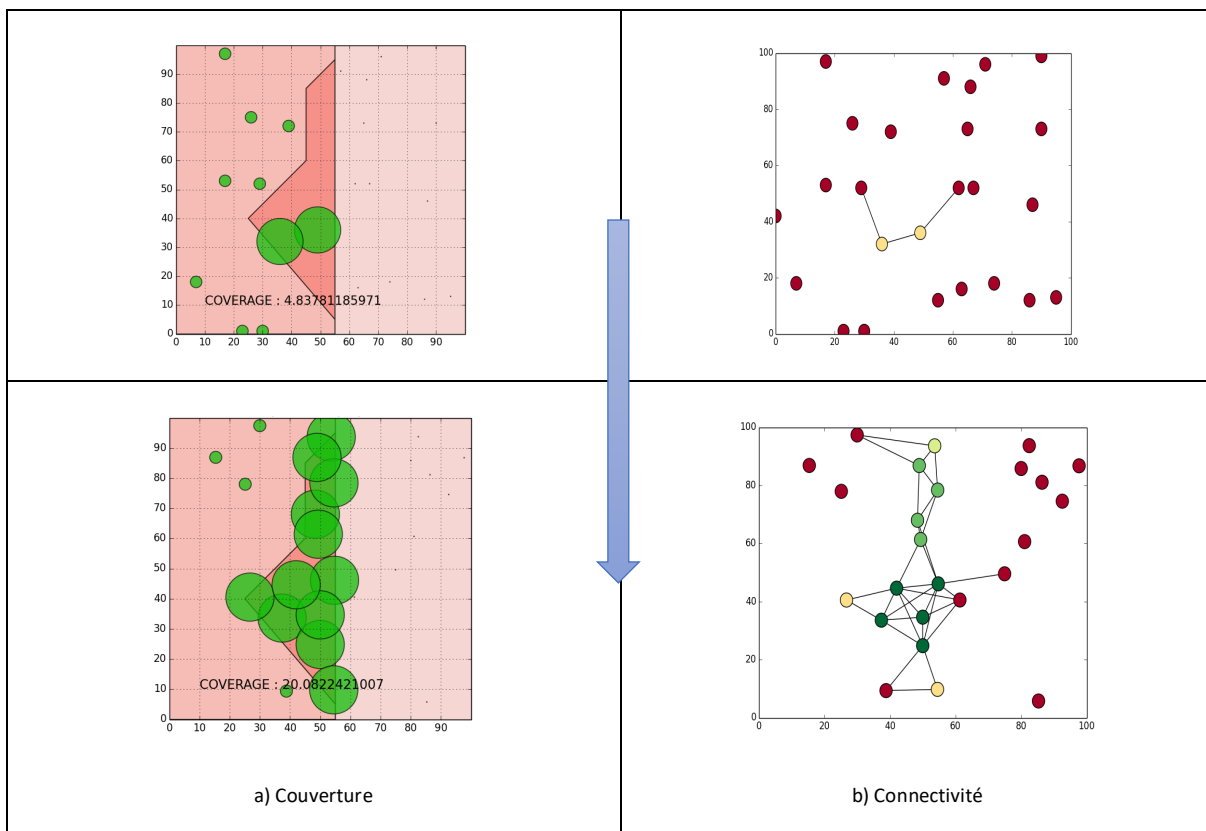


Figure 19 : Exemple d'optimisation de déploiement en zone avec atténuation de signal (2)

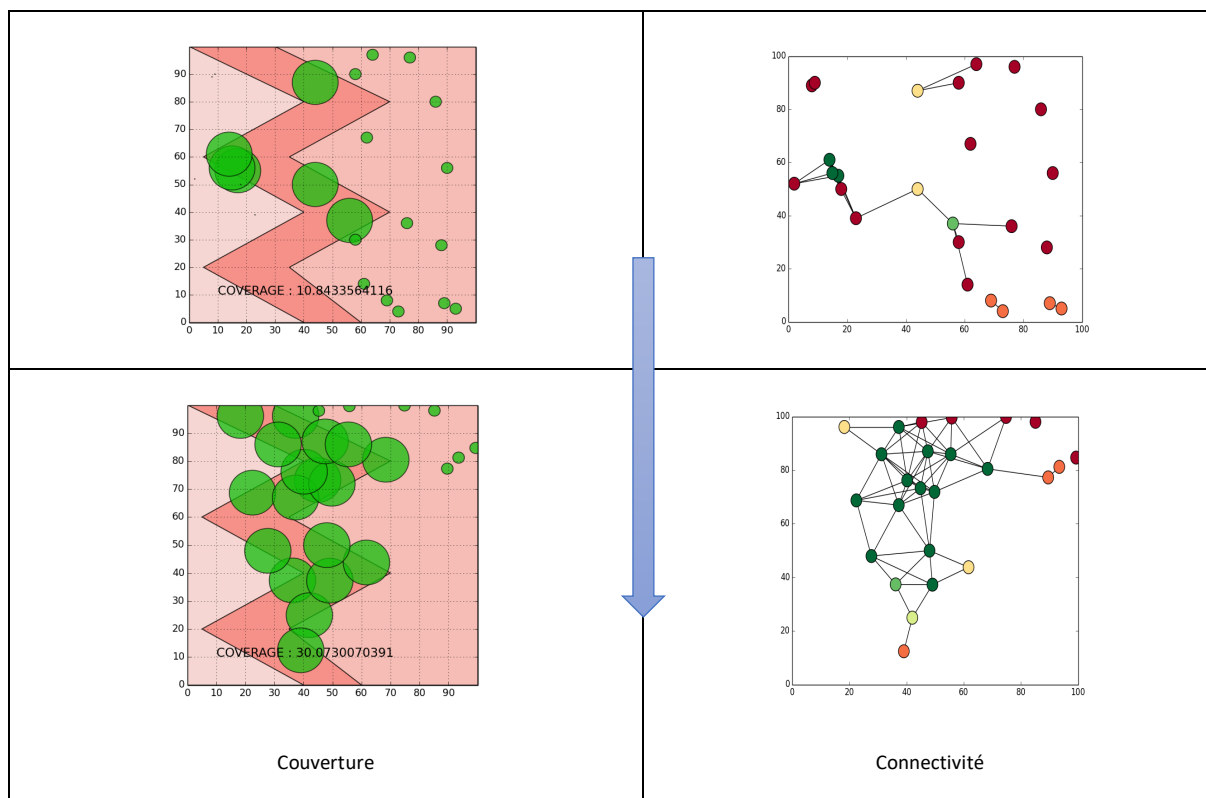


Figure 20 : Exemple d'optimisation de déploiement en zone avec atténuation de signal (3)

Ces études[19][20], dans le cadre des modélisations-simulations-optimisations, nous ont permis de développer un certain nombre d'outils pour aider à la phase de déploiement de capteurs sans fil dans le cadre du suivi environnemental en situation réelle. Cependant, cet aspect très théorique, que nous venons de voir, n'a pu s'affranchir totalement de déploiements de RCSF en situation réelle pour plusieurs raisons :

- il était nécessaire de compléter les études pour valider certains des concepts et observations théoriques dans le cadre des déploiements du RCSF.
- il était important de caractériser des performances en situation réelle de dispositifs pour répondre à nos besoins d'observations de phénomènes ou d'êtres vivants.
- il fallait tester du matériel dit «sur étagère» et l'éprouver pour nos besoins expérimentaux.

#### 2.4 Caractérisation de performances de RCSF en observation réelle d'incendie

Suite aux différents travaux réalisés grâce à la simulation pour déployer des capteurs sans fil dans sa partie réseau, une partie des travaux a consisté à la caractérisation et l'évaluation des performances pour le déploiement de RCSF, la remontée d'informations dans différents programmes scientifiques. Ces travaux se positionnent selon des essais inertes (sans combustion) au laboratoire, des essais en

combustion au laboratoire, et des essais terrain en incendie. Ils se répartissent au travers de plusieurs campagnes expérimentales de mesures illustrées par la Figure 21 :

- lors de brûlages dirigés en Corse (Noceta) organisés par les forestiers sapeurs dans l'objectif de protéger des zones forestières en réalisant des zones d'appui à la lutte en 2008 ;
- lors de feux expérimentaux sur le site de l'INRA AVIGNON au sein du plateau technique de Vignères illustré en 2010 ;
- dans le cadre d'expérimentation sur un site industriel pour un contrat de recherche et développement pour EDF Systèmes Électriques Insulaires (SEI).



*Figure 21 : Expériences de feu à plat et sur pentes en laboratoire à Corte au Plateau Vignères INRA Avignon et feu réel*

#### 2.4.1 Matériels dans le cadre des expérimentations

Les tests ont été réalisés dans un premier temps, avec un matériel Memsic Technology. Ils sont apparus en 2005 comme les premiers outils configurables dans le cadre d'expérimentation réelle avec un coût

relativement accessible (une centaine d'euros l'unité) Les capteurs sans fil dans leur configuration standard sont constitués d'un radio émetteur-récepteur appelé MicaZ, comme illustré par la Figure 22. Le dispositif est alimenté en 3.5 V par deux piles de 2300 mAh de capacité (les piles AA courantes). Ce circuit sert d'élément de base (un nœud) à une plateforme à faible puissance de réseau de capteurs sans fil. Il s'appuie sur un standard de communication 2.4 Ghz IEEE 802.15.4 le Zigbee. Le Zigbee est une alternative basse consommation des solutions Wifi courantes. Il s'en distingue par une portée plus faible d'un émetteur-récepteur à l'autre (plusieurs centaines de mètres pour le Wifi – une dizaine de mètres pour le Zigbee). Chaque circuit transfère un volume de données de 250 kbps, soit une émission/réception de messages de 0.25 Mo chaque seconde en théorie. Le MicaZ présente un autre grand avantage qui est son faible coût énergétique. Il peut également s'incorporer dans un réseau de 1000 unités car chaque nœud est un routeur potentiel. Plus précisément, chaque nœud est capable de rediriger l'information en provenance de ses voisins vers un récepteur proche qu'il considère comme optimal. La qualité principale de cette aptitude est que le réseau est auto-cicatrisant en cas de panne d'un élément, si des récepteurs voisins sont à portée. Les MicaZ peuvent recevoir une carte d'acquisition de données (MDA 300 CA) qui porte par défaut une sonde de température et un capteur d'humidité comme nous pouvons le voir sur la Figure 22.



*Figure 22 : Capteurs MicaZ de la société MEMSIC / Capteurs avec protection thermique Zetex et laine céramique*

Dans un premier temps, il a été nécessaire de caractériser rapidement les performances de notre outil de mesure sans fil au regard des dispositifs filaires existants au sein du laboratoire et de l'équipe feu. Cela a permis d'identifier des caractéristiques retranscrites dans le cadre de suivi du feu :

- une relative cohérence de capacité de mesure dans le cadre d'un stimuli direct ;
- une importante saturation des capteurs préinstallés par défaut sur les Micaz par rapport à des thermocouples sur un dispositif filaire.



Pour nous permettre de répondre aux besoins matériels des chercheurs du projet Feu, des ajustements ont été réalisés pour développer un dispositif sur des entrées analogiques différentielles +/- 10 mV, utilisé pour fabriquer des nœuds dédiés à la mesure physique précise dans un incendie proposé sur la Figure 23.

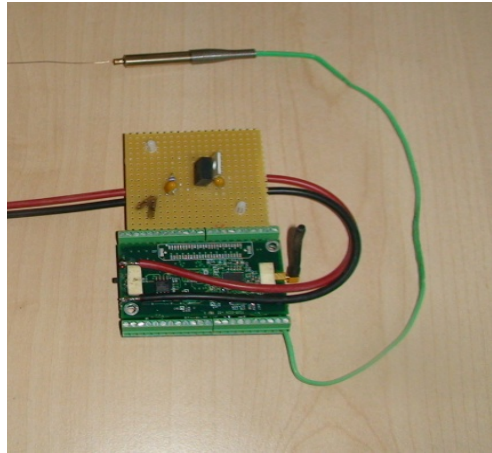


Figure 23 : Câblage d'un capteur de température (fil vert) sur le duo MicaZ

Deux types de mesures thermique sont exploitées : il s'agit d'abord de la mesure de la température de la phase gaz permettant la détection de la présence d'une flamme sur le capteur et à tout le moins, d'un courant d'air chaud. La seconde mesure concerne le flux thermique rayonné par une source de chaleur vers le capteur. La mesure de température est réalisée en immergeant la soudure de deux fils électriques, différant l'un de l'autre par le métal les constituant, dans un champ thermique de température  $T_1$  donnée. La seconde soudure étant laissée à la température  $T_2$ , il en résulte une différence de potentielle proportionnelle à la différence de température  $T_1 - T_2$ . Elle est réalisée dans notre situation à l'aide d'un thermocouple K (association Chromel-Alumel pour un intervalle de température  $[-100 ; 1370]$  °C). Le thermocouple K renvoie un signal dans l'intervalle  $[0-40\text{mv}]$ .

**La mesure du flux de chaleur rayonné** repose sur la mesure des températures aux deux faces d'un corps solide, en général de géométrie cylindrique, dont l'une est exposée au flux de chaleur incident. A partir de la mesure du flux thermique traversant le corps solide, on mesure le flux incident sur la face exposée. La calibration d'un fluxmètre repose principalement sur son exposition au flux émis par le corps noir, la source radiative obéissant à la loi de Planck. La réponse d'un fluxmètre en différence de potentiel est fonction du flux incident émis par la source. Les fluxmètres sont des fluxmètres

Medtherm ©, calibrés à 3 % d'erreur pour la gamme [1-200] kW/m<sup>2</sup> pour l'étude<sup>2</sup>. Le fluxmètre retourne un signal à 0-10 mV. Il est donc dédié aux entrées analogiques de la carte MDA.

**La détection d'une source de chaleur fluide**, réactive (flamme) ou inerte (fumée) s'appuie sur la tenue des instruments électroniques aux transferts thermiques dus à ces courants. Chaque nœud de mesure est donc thermiquement protégé par une enceinte en laine céramique, garantissant une tenue à des flux thermiques de 150 kW/m<sup>2</sup> et des températures en phase gaz de 800°C±300 °C comme illustré sur la Figure 22.

#### 2.4.2 Méthodes expérimentales

Les expérimentations se sont déroulées en plusieurs phases :

- Tests en feu réel avec MicaZ et capteurs par défaut
- Tests en laboratoires et en feu réel de MicaZ avec thermocouple.

Le système déployé et testé consistait en un réseau de capteurs sans fil capable à la fois de mesurer la température de l'air, le taux d'hygrométrie dans les zones à surveiller et de transmettre cette mesure à un ordinateur de traitement qui va qualifier la criticité d'une éventuelle augmentation. Celle-ci est évaluée comme le franchissement d'un seuil en température menant à la température de point-éclair la plus basse pour les mélanges gazeux possibles en atmosphère libre. Les courants d'air environnants présentent naturellement des fluctuations de température liées au régime des écoulements. Les nœuds de mesures doivent donc être placés de façon optimale sur un site pour garantir l'identification après analyse des sources de courant chaud. Cette évaluation nécessite de décliner des scénarios expérimentaux d'incendie, illustré par la Figure 24, en s'appuyant sur nos résultats de simulation. Nous avons pour cela choisi de réaliser nos tests sur des petits réseaux avec une station de base pour favoriser les remontées rapides d'information. Un certain nombre de caractéristiques devait être validé durant ces campagnes de mesure en feu réel :

- la précision de la mesure locale en n points ;
- le temps caractéristique de traitement des signaux émis ;
- la qualité des communications sans fil établies dans le périmètre à surveiller ;
- la résistance de ce dispositif aux incendies selon un procédé de protection en Zetex appelé Firesensorsock.

---

<sup>2</sup> Nous rappelons à ce stade que le four domestique à pleine puissance émet au centre de son enceinte un flux de chaleur de 5 kW/m<sup>2</sup>.

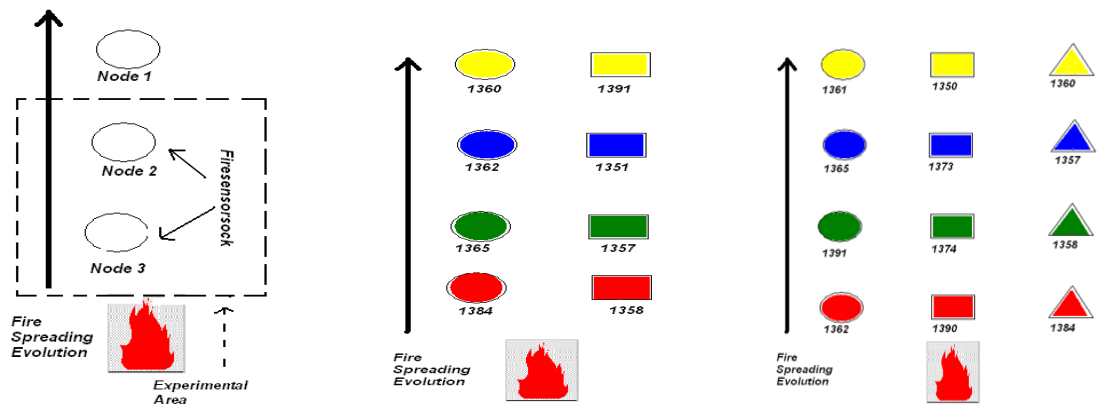


Figure 24 : Schémas expérimentaux en feu réel avec MicaZ et MDA300 (3 , 8et 12 nœuds)

Dans un second temps, nous avons ensuite testé les performances des MicaZ équipés d'un thermocouple en tests de laboratoire pour évaluer les réponses selon le schéma expérimental illustré par la Figure 25. L'objectif était de mesurer les performances en termes de réponses entre un dispositif filaire (CR3000, utilisé historiquement par les membres de l'équipe feu) et la réponse des MicaZ équipés de thermocouples avant l'utilisation en situation réelle.

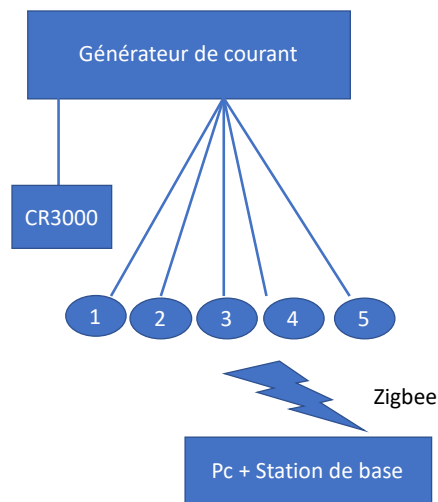


Figure 25 : Schéma expérimental pour des tests filaires – sans fil avec thermocouples K

Les résultats et principales conclusions sont présentés dans la partie suivante.

#### 2.4.3 Les résultats obtenus

Les résultats aux expériences en feu réel (Noceta) et sur le plateau de Vignères) ont démontré une certaine fiabilité dans l'utilisation des RCSF[21].

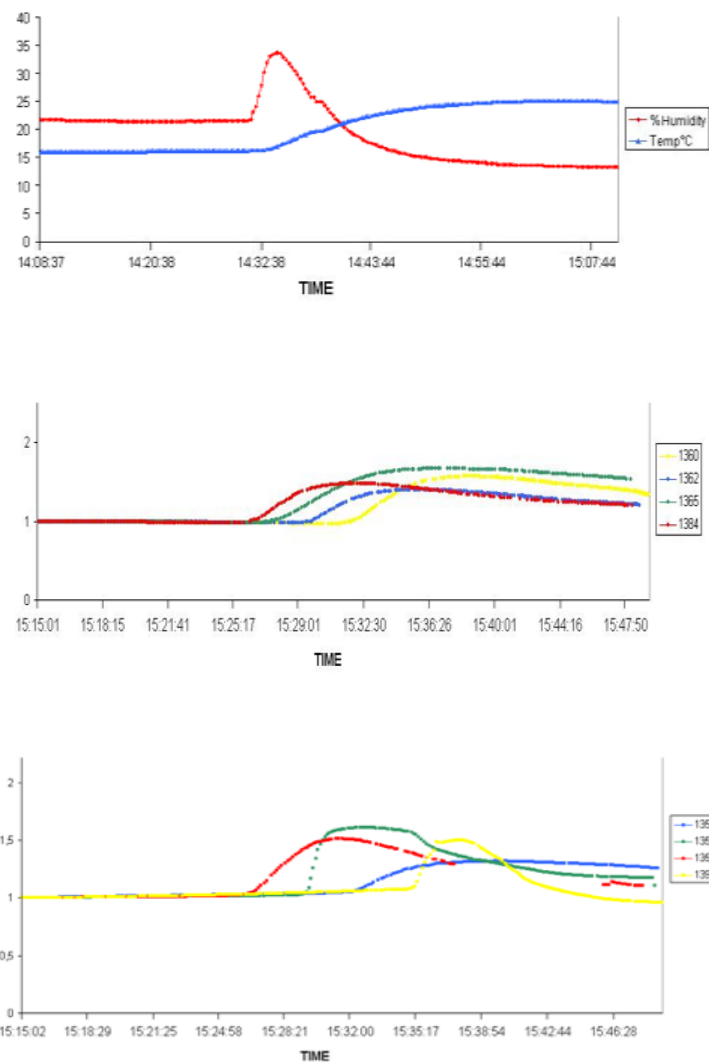


Figure 26 : Caractérisation des performances des réseaux de capteurs sans fil dans un feu réel

En effet, nous sommes en mesure de suivre des propagations d'incendie, d'en déterminer des vitesses de propagation. La précision de la mesure locale en n points a montré la capacité du réseau à répondre à une sollicitation physique (augmentation de la température, chute de l'humidité). Mais nous considérons que les mesures physiques ne sont cependant pas précises ; elles sont relatives au matériel utilisé et dépendantes de la plateforme des MicaZ et du matériel. La qualité des communications sans fil établies dans le périmètre avec l'utilisation de technologie sans fil Zigbee semble pertinente avec un réseau maintenu durant l'ensemble des expérimentations. Cependant, nous observons la rupture de certaines communications, amenant l'hypothèse du phénomène physique feu comme un possible frein ou perturbateur à la transmission des ondes radio. La topologie du réseau et la mise en place d'un protocole de routage spécifique semblent nécessaires à la résilience

du réseau en cas de défaillances, confirmant les premiers résultats de nos simulations. Pour compenser l'imprécision, l'ajout de thermocouples au MicaZ et des tests en laboratoire ont été réalisés.

Nous complétons ces premiers résultats avec les tests sur signaux électriques dans la configuration à 5 nœuds en laboratoire. Notons tout d'abord que ces tests excluent toute question relative à la topologie et au déploiement du réseau dans un environnement donné ; chaque nœud étant à égale distance de la station base. Les messages empruntent donc le même chemin, direct, de l'émetteur soumis au signal de référence jusqu'au PC pilote sur lequel est connecté à la station base.

Ces tests académiques concernent la génération d'un sinus (réponse à un signal créneau) comme exemple d'un signal régulier (réponse discontinue) et la comparaison de l'enregistrement par le réseau sans fil à plusieurs nœuds et une centrale d'acquisition filaire. (CR3000).

La Figure 27 représente une comparaison entre le signal sinusoïdal enregistré sur la centrale filaire et le réseau sans fil à cinq nœuds. Trois fréquences ont été sélectionnées 0.01, 0.05 et 0.1 Hz, avec un échantillonnage à 1 Hz du signal émis. Cette dernière fréquence correspond aux cadences d'enregistrement des différentes expériences d'incendie sur le terrain publié dans la littérature scientifique. L'observation montre qu'à basse fréquence (0.01 Hz), toutes les courbes se rassemblent en une seule donnée par le signal de référence lorsqu'il est enregistré par le système filaire. On observe que des différences existent entre les signaux issus de l'enregistreur sans fil et celui du système filaire. La première de ces différences est un léger amortissement des extrema d'amplitude sur les valeurs min-max du sinus des enregistrements « sans fil » par rapport au filaire. Ensuite, les signaux issus du système sans fil présentent un retard par rapport au signal filaire, et ce, en dépit de la synchronisation des deux ordinateurs (la station filaire et le PC pilote du réseau sans fil).

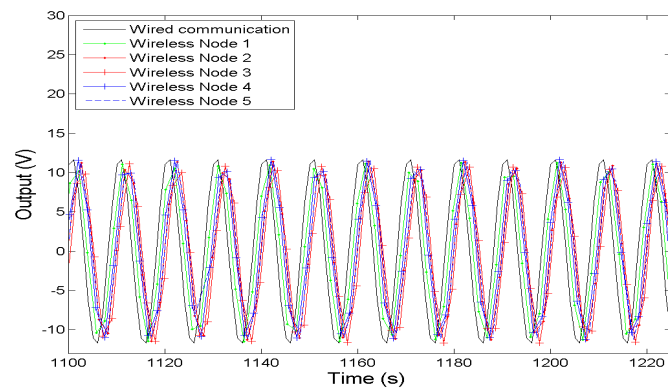
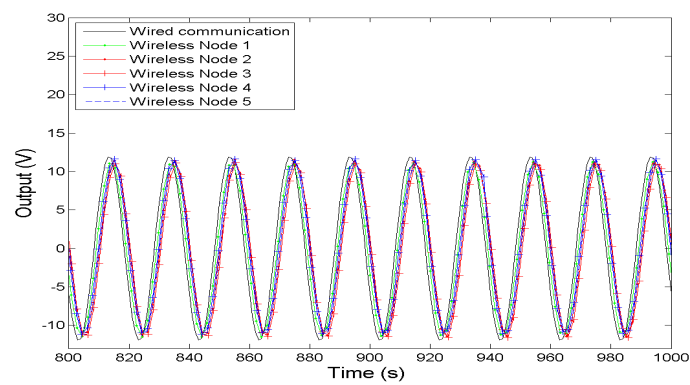
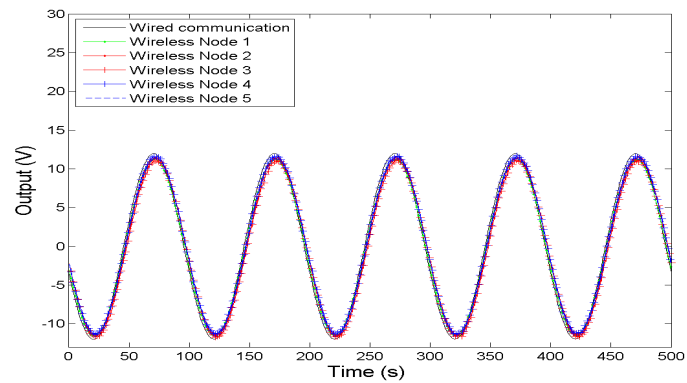


Figure 27 : Comparaison entre le signal sinusoïdal enregistré sur la centrale filaire et le réseau sans fil à 5 nœuds 0.01 (haut)  
- 0.5 (milieu) - 0.1 (bas)Hz

Afin de mesurer le retard, nous avons différencié les instants où chaque courbe coupe l'axe des abscisses (*zero-padding*). Le résultat de ce calcul est présenté par la Figure 28. On constate alors que les retards sont stables pour un seul nœud tandis qu'ils augmentent avec le nombre de nœud. Ils ont une valeur maximale voisine de 2 secondes, ce qui correspond au délai supérieur d'émission-réception des messages entre un nœud et la station base (les nœuds MicaZ émettent/reçoivent chaque

seconde). Ces résultats confirment la congestion du réseau aperçue lors de simulations, provoquant un décalage entre la mesure et la réception de l'information.

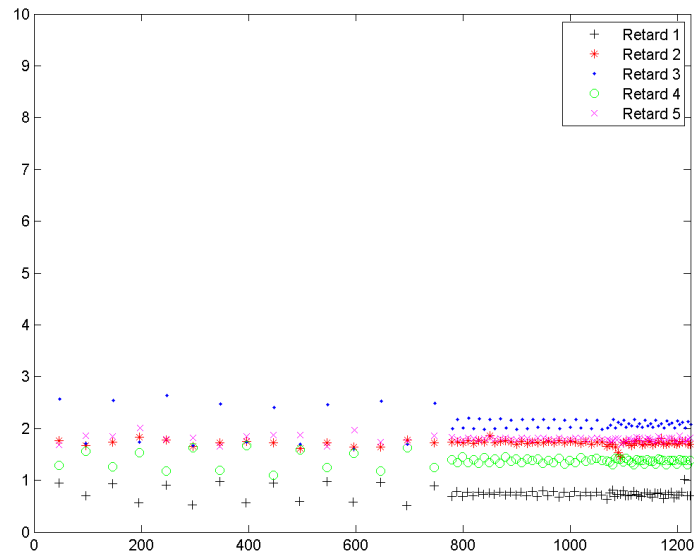


Figure 28 : Retard mesuré sur le signal sinusoïdal pour chaque nœud pour les fréquences 0.01 - 0.5 - 0.1 Hz

La Figure 29 représente une comparaison entre le signal carré enregistré sur la CR3000 (filaire) et le réseau sans fil à 5 nœuds pour les 3 mêmes fréquences 0.01, 0.05 et 0.1 Hz. On observe également un amortissement des extrêmes d'amplitude. De plus, on voit très nettement un décalage manifeste apparaître entre le signal de référence capturé sur la centrale filaire et celui enregistré sur chaque nœud du réseau sans fil. Dans le cas d'un signal en créneau, le calcul du retard par *zero-padding* peut être source d'erreur : nous avons donc choisi de le calculer comme le délai entre les premiers instants d'amplitude maximale des signaux.

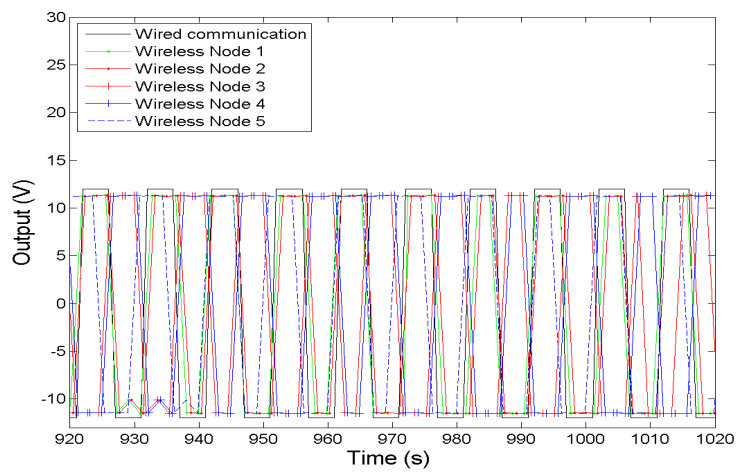
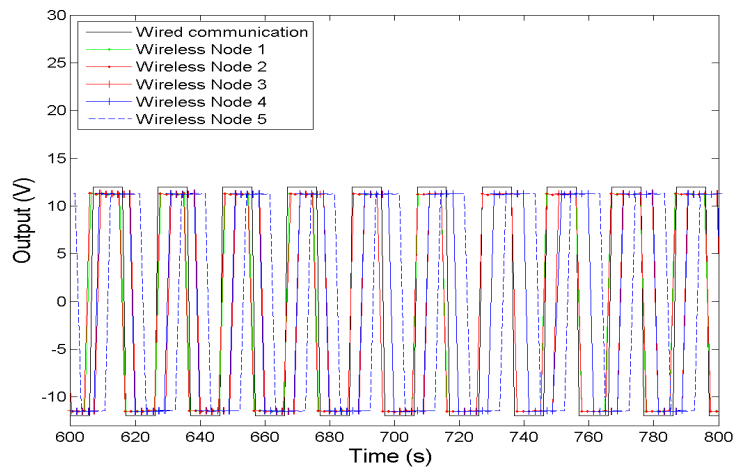
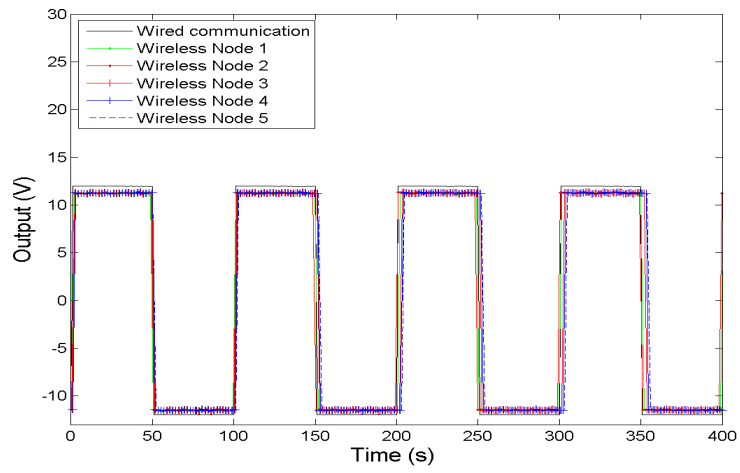


Figure 29 : Signal en créneau pour la fréquence 0.01 (haut)- 0.5 (centre) -0.1 Hz (bas).



Les résultats sont reproduits sur Figure 30. On voit clairement une augmentation du retard entre le signal de référence et un nœud, qui est significative à chaque changement de fréquence du signal. Ce retard augmente aussi avec le nombre de nœuds. Nous avons retenu alors que les conditions pour lesquelles le réseau sans fil est capable de capturer des changements brusques dans les signaux ne sont pas réunies selon ce dernier test. La « latence » du réseau sans fil est une problématique dans le suivi précis de l'élévation de température.

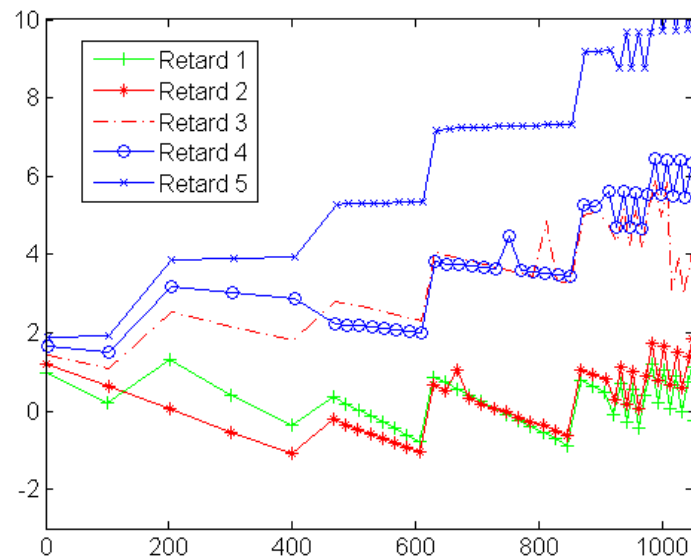


Figure 30 : Retard mesuré sur le signal en créneau pour chaque nœud pour les fréquences 0.01 - 0.5 - 0.1 Hz

Suite à ces résultats, il a donc été convenu d'utiliser les RCSF seulement afin d'observer seulement la réponse dans des situations d'incendie en propagation, puisque la détection d'une flamme par un thermocouple s'apparente à un changement très rapide de température dans la phase gazeuse d'un milieu combustible. Cette étude a été appliquée dans le cadre d'un programme financé par EDF dans la surveillance d'un site de stockage de fioul lourd (atmosphère explosive). Soumis à un contexte de confidentialité industrielle, nous n'avons pu communiquer sur les résultats, mais un certain nombre de rapports internes ont été produits [22][23]. L'objectif était de déployer un RCSF sur un site de stockage de fioul (Bastia, centre de stockage de Lucciana) avec comme finalité de réaliser des levées de doute de détection d'incendie à distance et en milieu explosif. Des résultats concluants ont permis de positionner ces travaux dans une phase de développement industriel à laquelle je n'ai pas souhaité participer.

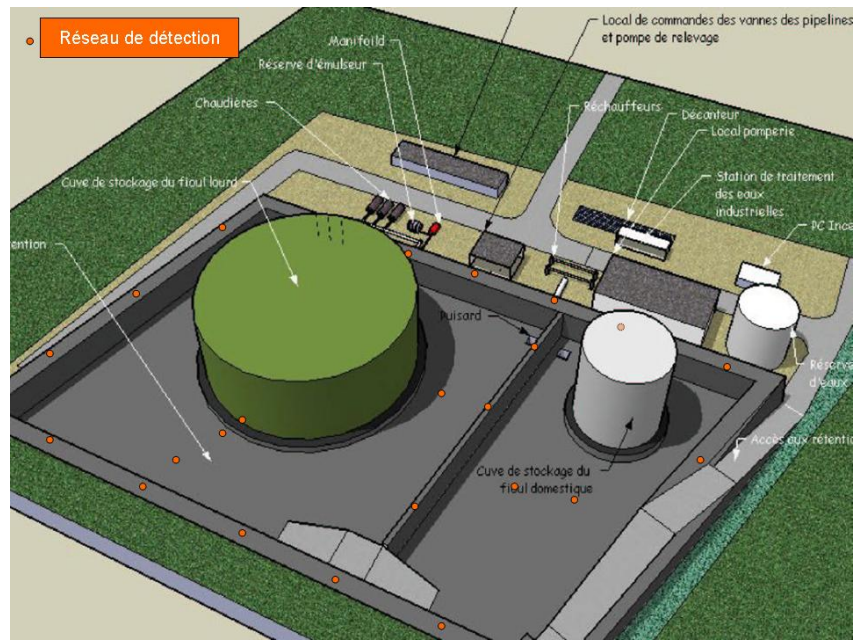


Figure 31 : schéma de déploiement d'un réseau de surveillance sans fil dans une zone ATEX 2 autour de cuves FO2 et FOD

Des tests avec combustibles ont ensuite été réalisés en situation réelle pour éprouver le dispositif évalué en laboratoire. Je n'ai pu prendre part à ces derniers tests dont les résultats ont été publiés dans une revue [24].

Suite à ces expérimentations et à la compétence scientifique développée dans la capacité à déployer des RCSF dans le cadre de besoins en instrumentation scientifique, j'ai été sollicité pour déployer et développer des RCSF dans d'autres programmes de recherche pour la collecte de données environnementales et ainsi orienter ces dispositifs comme de nouveaux outils scientifiques.

## 2.5 Déploiement pour la surveillance de réserve en eau (2010-2012)

Dans le cadre du programme Marritimo RES-MAR, on m'a demandé de contribuer à l'alimentation d'un modèle pour la simulation de réserves hydriques. Pour alimenter le modèle données, l'objectif était d'alimenter une base de données par un réseau de capteurs pour la surveillance du niveau d'un bassin tampon [25] sur différents paramètres : niveau, turbidité de l'eau, température. Ce travail a été réalisé en partenariat avec la société Agriscope, spécialiste du développement de capteurs pour le secteur agricole. Le site expérimental est le bassin de l'OSO, en aval du barrage de l'Ospedale (zone de Porto-Vecchio en Corse du Sud), qui possède un bassin « tampon » où doit être mesuré un niveau d'eau pour en déduire un débit. La problématique du déploiement a été rapidement identifiée concernant en premier lieu les communications du réseau. En effet, ce site est isolé en couverture GSM et ne possède pas d'alimentation électrique. L'objectif était de déployer un réseau de capteurs sans fil autonome en énergie et d'acheminer une information vers un poste relié au GSM, avec une ligne RTC et alimenté en

courant, se trouvant à 5 km. Nous avons réfléchi à porter le signal radio du point de mesure, jusqu'à une antenne relais, puis un abri qui disposait d'une carte SIM comme illustré par la Figure 32.

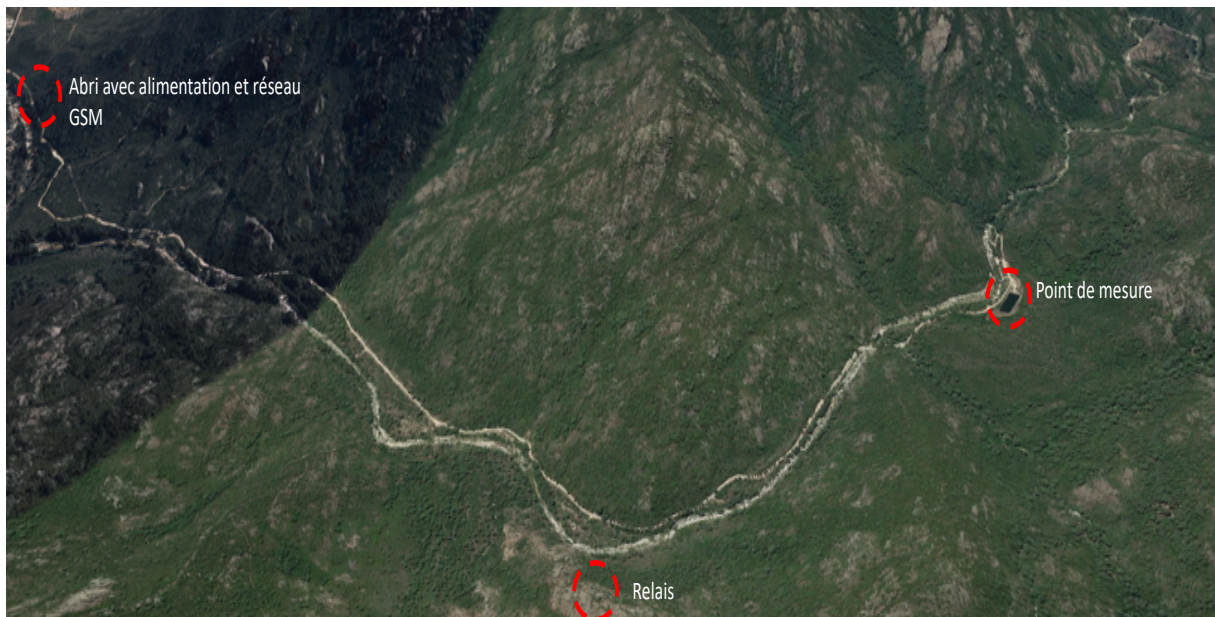


Figure 32 : Site expérimental montagneux de l'Oso (Corse du Sud)

Le standard Zigbee (éprouvé dans les expériences liées au feu) ne correspondait plus aux exigences du site expérimental, car nous étions obligés de multiplier les capteurs-routeurs pour acheminer l'information jusqu'à l'abri alimenté. Le choix s'est porté sur une modulation du signal radio en 868 MHz ayant une portée relative de 6km pour une puissance de 500mW et une sensibilité de -120dBm<sup>3</sup>. Le positionnement du relais a été fait de manière empirique, après plusieurs tests de renvoi de données dans cette zone très montagneuse avec des arbres hauts.

Le dispositif principal, illustré par la Figure 33, proposait un ensemble de données dans un bassin de rétention avec une base de communication vers un relais. Le capteur de niveau d'eau utilise une technologie sans contact par ultrason. Cette technologie minimise l'entretien de la prise de mesure, opère dans une forte humidité et survit à l'immersion dans les liquides. Le niveau est obtenu par mesure de pression différentielle entre la surface du liquide et la position du transmetteur immergé.. Le capteur de turbidité utilise une méthode optique pour mesurer les particules solides en suspension

---

<sup>3</sup> Ce type de communication respectait la directive européenne 1999/5/CE dite "R&TTE" (Radio And Terminal Telecommunication Equipment) concernant les terminaux de télécommunication et les équipements radio. L'ensemble de ces produits entrant dans le domaine d'application de la directive et disponible sur le marché européen devait être obligatoirement conforme à cette directive. Cette directive a été totalement abrogée le 13 juin 2016 permettant l'avènement de nouvelle technologie développée par l'alliance LoRa ou la société SIGFOX.

et la turbidité. Ce capteur est destiné à des applications telles que : le jaugeage de rivières et de ruisseaux, la surveillance des opérations de dragage et de l'exploitation minière, le contrôle de qualité de l'eau dans les réservoirs et les bassins de décantation, l'étude du transport des sédiments. Un pluviomètre à augets a complété le dispositif de mesures.

Une seconde problématique a été l'alimentation électrique. Nous ne disposions pas d'alimentation dans la zone expérimentale. Nous étions dans l'obligation de fonctionner, durant plusieurs semaines, sans possibilité de changer les piles. Dans ce contexte, des panneaux solaires couplés à des batteries ont été ajoutés pour nous permettre de déployer des dispositifs autonomes énergétiquement.



Figure 33 : Point de mesure de niveau et de qualité de l'eau dans bassin

Ces travaux représentent une contribution assez basique dans la phase de développement et de déploiement de surveillance environnementale avec pour objectif principal d'alimenter en données un modèle de simulation. Cependant, ils ont permis d'identifier le besoin d'un déploiement assisté de RCSF, optimisé en milieu naturel, une problématique sur l'autonomie de RCSF en site isolé, de mettre en évidence la fréquence 868 MHz dans une transmission longue portée de signal.

Nous verrons comment cette étude a pu être capitalisée dans le déploiement de solutions dans d'autres programmes scientifiques et en particulier pour le suivi du vivant.

## 2.6 Tests et développement de dispositifs pour le suivi du vivant (2012-2020)

La Méditerranée représente une entité à part entière, remarquable de par sa biogéographie et sa très forte biodiversité par rapport à sa surface (*hotspot*), avec une biodiversité marine représentant 7,5 % de la faune marine mondiale. Cependant, l'eau et les ressources associées de Méditerranée se trouvent particulièrement vulnérables face aux nombreuses pressions anthropiques, telles que la pollution, l'eutrophisation, la surexploitation des ressources, la forte croissance démographique, le transport maritime dense, le tourisme exacerbé, et ce d'autant plus dans un contexte de changement climatique global. L'érosion de la biodiversité en Méditerranée a été classée comme étant la plus inquiétante. Les ressources halieutiques littorales et marines doivent être aujourd'hui gérées comme un patrimoine précieux ; leur exploitation doit être organisée pour permettre la satisfaction optimale de l'ensemble des besoins, éviter les gaspillages, empêcher des dégradations irréversibles et assurer les recyclages indispensables. C'est dans un contexte de surexploitation chronique des ressources halieutiques et de dégradation de l'environnement marin mondial que l'Università di Corsica (à travers sa plateforme marine Stella Mare UMS CNRS-UCPP 3514), s'intéresse à cette problématique et vise à apporter des solutions (tout au moins au niveau de la Méditerranée) pour de la préservation et de l'exploitation éco-soutenable des ressources naturelles littorales, à travers l'aquaculture durable et la pêche responsable.

Depuis un certain temps, l'utilisation d'outils de géolocalisation à distance permet de mettre en œuvre des dispositifs pertinents pour suivre des espèces animales dans leur milieu naturel sans recours à de grandes campagnes de suivi et d'intrusion directe de l'homme dans l'environnement [26][27][28][29]. J'ai été amené à contribuer aux travaux d'ingénierie écologique, en particulier au déploiement de capteurs sans fil en milieu sous-marin pour identifier la position de certaines espèces terrestres et marines, dans le cadre des programmes scientifiques AMBiEnTE, HAL et HAL2. L'objectif était de pouvoir observer le comportement de certaines espèces en milieu naturel et d'en déduire des comportements à partir des données collectées. Dans le cadre du programme de recherche AMBIENTE, nous avons travaillé au développement d'un dispositif de suivi à distance utilisant une technologie de communication de longue portée avec une faible consommation énergétique appelé AMBLoRa.

### 2.6.1 Caractérisation de dispositifs marins

Une partie des travaux a consisté à développer et déployer des systèmes d'objets connectés afin de pouvoir opérer le suivi comportemental en temps réel d'espèces terrestres et marines grâce à des transmissions sans fil de données (en particulier de géolocalisation) d'espèces marines dans l'objectif d'aider à construire ou déduire des modèles comportementaux.

### Méthode de traque active

Une première série de travaux [30] nous a permis de travailler sur des campagnes expérimentales de suivi d'araignées de mer et de homards, en les équipant de dispositifs de la société VEMCO comme montré sur la Figure 34. L'objectif était de déployer des balises fixes (stations de base) suivant une topologie maillée, d'en déduire plusieurs caractéristiques sur les signaux émis par des balises positionnées sur des araignées de mer : la précision relative de la position, la force du signal, la robustesse du dispositif dans un suivi à long terme. Des campagnes de traque passive (réception de signaux par des stations de base fixes) ont permis de caractériser les performances du matériel VEMCO dans la problématique du suivi d'espèces se déplaçant sur le sol marin.



*Figure 34 : Une araignée de mer équipée d'un dispositif de géolocalisation VEMCO*

La communication acoustique est un problème ancienne, mais avec des leviers scientifiques encore très prégnants[31][32]. Elle permet une transmission de longue portée, mais elle souffre de pertes de transmission et de distorsion du signal variant dans le temps en raison de sa dépendance à des éléments environnementaux comme la salinité, la température, la pression, la profondeur des émetteurs-récepteurs et la géométrie de l'environnement. Le canal acoustique sous-marin (UAC) est connu comme l'un des supports de communication les plus complexes actuellement utilisés. Le signal acoustique voyageant entre l'émetteur et récepteur est soumis à des mécanismes destructeurs qui atténuent les signaux reçus autour de trois types de pertes significatives : perte par propagation, perte par absorption, perte par dispersion.

Nous avons, dans un premier temps, caractérisé les performances de ces dispositifs dans différentes phases de suivi d'araignées de mer avec du matériel de la société Vemco sous la forme de balises de traçage (V9 et V13) et un hydrophone omnidirectionnel VH165. La méthode de traque active consiste à suivre et collecter le signal émis par les balises à l'aide des hydrophones au sein d'un embarcation, et à procéder à un post-traitement des données pour disposer des positions.

Les résultats obtenus nous ont permis de caractériser certaines performances des dispositifs en mer, comme illustré sur les Figure 37 et Figure 41, par une phase de reconstitution des signaux reçus, et ont permis d'identifier les limites de la méthode traque active et de tels dispositifs.

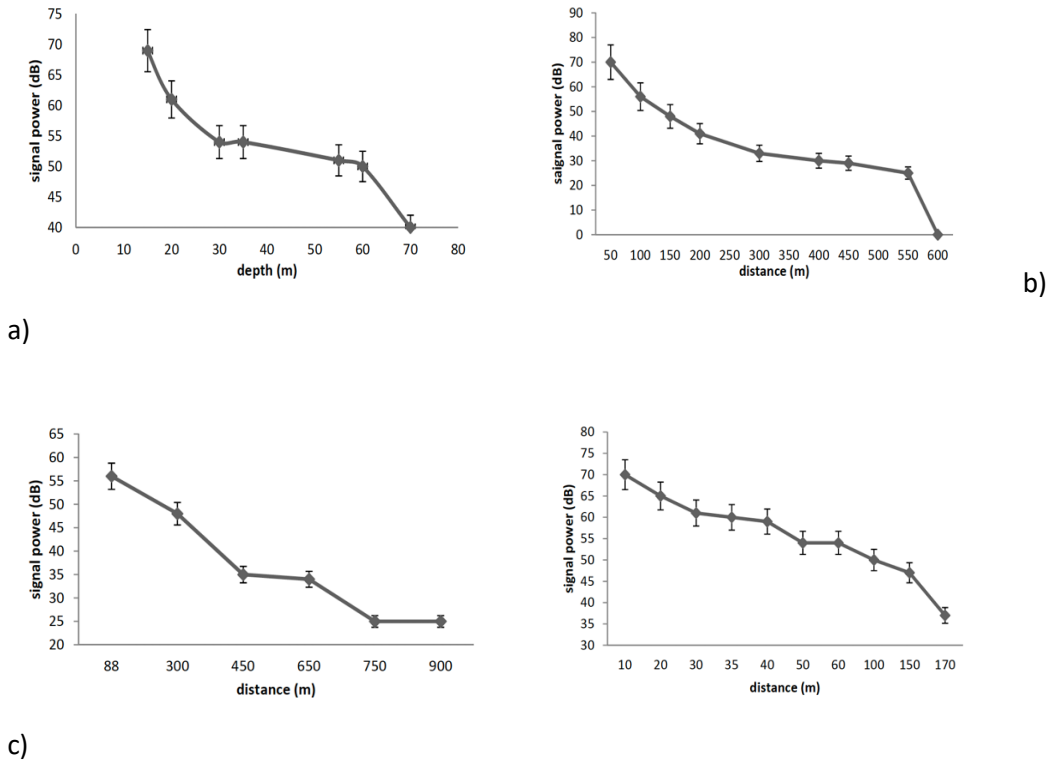


Figure 35 : Force du signal de différents matériels en fonction de la profondeur et la distance d'un récepteur passif pour les balises de traçages V9 (a) et b)) et V13 (c) et d))

En effet, nous voyons apparaitre des atténuations du signal dues en partie à la profondeur et à l'éloignement de la balise de l'hydrophone. Ces atténuations sont dues à des perturbations dans le milieu comme des rochers. De plus, le suivi en milieu sous-marin est fortement impacté par les bruits de l'environnement avec des phénomènes d'absorption et de réfraction des ondes sonores comme illustré sur la Figure 36 par rapport à une ligne de mire (Line of sight) transmetteur-recepteur.

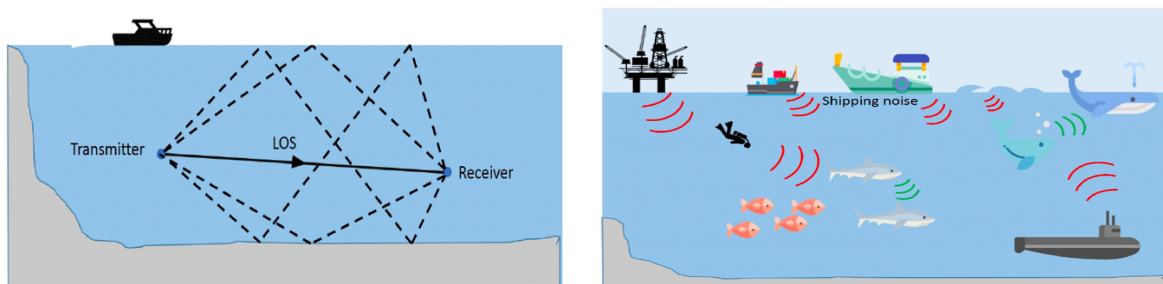


Figure 36 : Diffraction des ondes et perturbation du signal selon [32]

Cependant, les premières balises positionnées sur des araignées de mer, nous ont ainsi permis de les suivre le long d'une côte comme illustré sur la Figure 37. Mais la méthode est coûteuse en temps (durée des sorties en mer, conditions météo optimales, plusieurs campagnes de mesure à intervalles réguliers) et en énergie (bateaux, ressources humaines mobilisées) déployée à faire de la traque active.

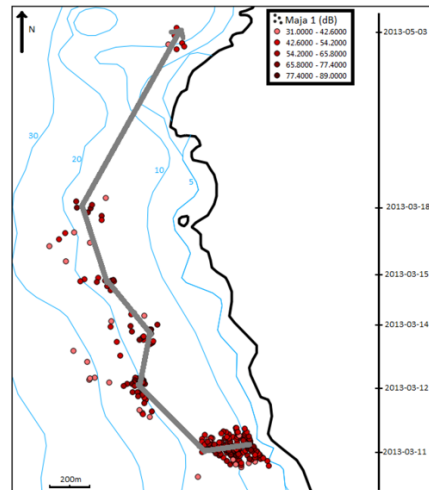


Figure 37 : Signaux collectés durant une campagne expérimentale dans le cadre du suivi d'une araignée de mer

### Méthode de traque passive

Les premiers résultats en milieu sous-marin de manière traque active nous ont conduit à développer une expérience de traque passive. L'objectif est de développer un réseau de balises fixes et de traiter le signal émis pour faire de la géolocalisation[33]. Les deux phases identifiées étaient, dans un premier temps de définir un schéma de déploiement de nos balises passives, et dans un second temps de définir une méthode de filtrage des données.

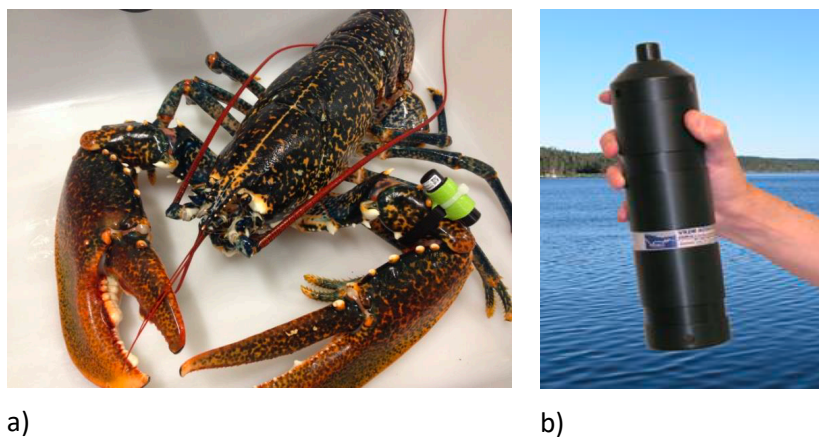


Figure 38 : Hommarus Gammarus équipé de balise V13 et une balise de réception acoustique passive VR2W



Nous avons positionné un maillage de la zone de traque passive autour d'une épave de bateau, lieu de niches des homards comme montré sur la Figure 39.

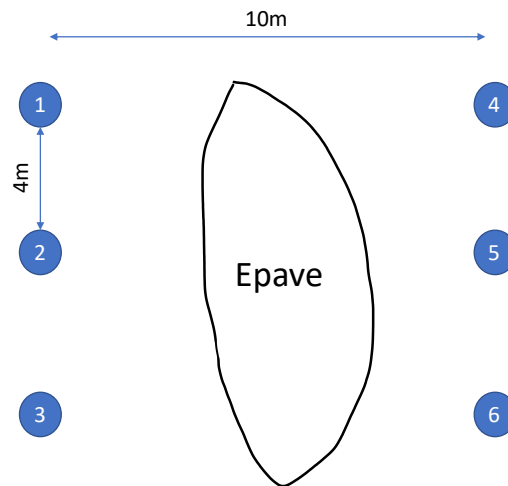


Figure 39 : Définition de la zone expérimentale de traque passive

Comme explicité précédemment, les bruits sont importants et peuvent provoquer une distorsion du signal lors de sa réception. Nous voyons, sur la Figure 40, les valeurs du signal émis par une balise en bleu. Ce signal n'est pas rectiligne selon une fréquence donnée et il subit beaucoup de perturbations causées par le bruit ambiant. Nous disposons par conséquent d'une courbe discrète définie par un nuage de points 8798. La méthode classique de lissage de Savitsky-Golay permet de filtrer les données reçues et d'en extraire une courbe lissée selon une méthode de *smoothing* [34] en L10. Ce signal filtré va nous permettre d'en extraire les valeurs et de proposer une triangulation par rapport au maillage des balises.

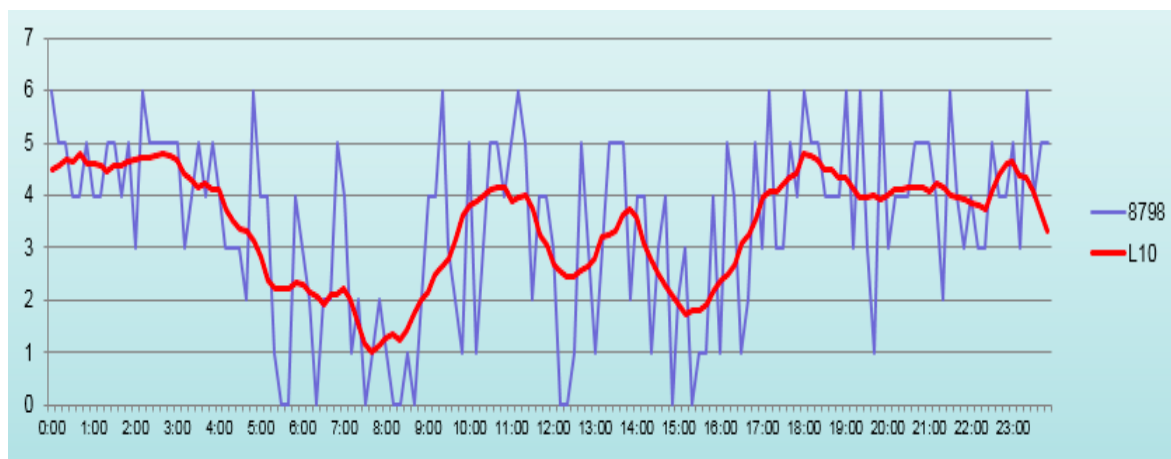
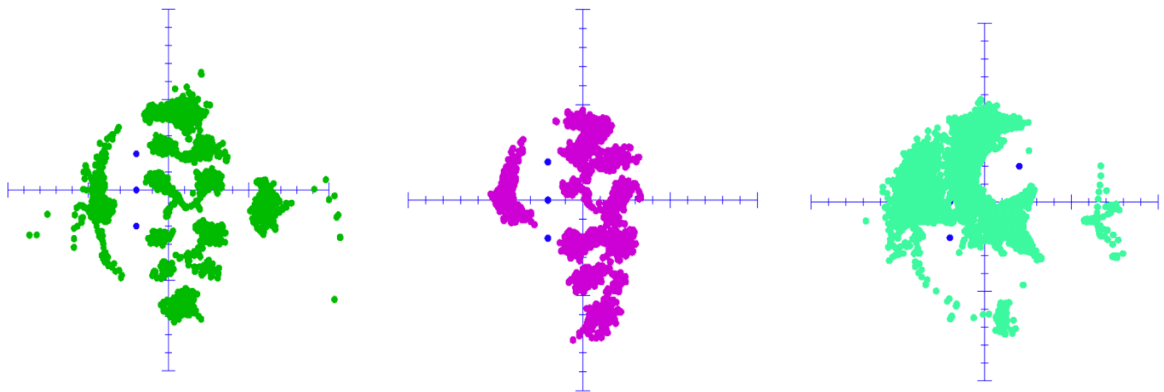


Figure 40 : Signal bruité émis par le Homard avec la balise 8798 et sa courbe L10 lissée selon la méthode de Smoothing de Savitsky-Golay

Pour déterminer la position des balises, nous avons procédé de manière itérative dans le traitement des signaux pour reconstituer la valeur du signal par le biais d'une recherche opérationnelle. Il est important de préciser que nous considérons que la réception du signal n'est pas orientée et qu'elle dépend seulement de la distance de chaque individu au regard de chaque balise du dispositif. Dans l'ensemble de valeurs générées par chaque signal sur chaque balise fixe, nous procédons à une recherche itérative de valeurs minimales dans un ensemble de valeurs générées en utilisant l'algorithme traditionnel de Levenberg-Marquardt (LM).

Les résultats post-traités de quelques homards sont proposés sur la Figure 41. Nous pouvons distinguer des points bleu foncé qui représentent les positions de balises de réception, comme expliqué dans le schéma expérimental précédent. Nous pouvons distinguer les positions de trois homards (l'étude a porté sur 8 individus) et par un horodatage de leurs déplacements.



*Figure 41 : Reconstitution des positions de trois homards équipés de balises VEMCO en traque passive*

Cette méthode a été intéressante en termes de résultats mais reste complexe à mettre en œuvre pour plusieurs raisons :

- Le matériel VEMCO impose certaines limites dans l'utilisation et la remonté des données par le biais d'abonnements très coûteux.
- Des interruptions de signal ont été observées dans la transmission de données de certains émetteurs. En effet, certains individus se sont positionnés dans des rochers, bloquant le signal acoustique.
- La méthode de localisation donne des résultats satisfaisants pour répondre aux premières demandes des biologistes sur la constitution de connaissances, pour évaluer globalement un comportement mais s'appuie cependant sur de nombreuses approximations provoquées par une simplification voulue du traitement des données.

En effet, les mesures expérimentales des signaux, les méthodes de recherche traditionnelles peuvent comporter des erreurs qui vont ensuite se reporter lors de la méthode de lissage, provoquant une propagation de ces mêmes erreurs.

Ces travaux ont permis d'identifier des voies de réflexion dans le développement de dispositifs de suivi d'espèces marines plus précis et moins coûteux, et de pouvoir participer d'autres programmes de suivi terrestre.

#### 2.6.2 Développement de dispositifs de suivi terrestre (2011-2014)

Les travaux menés dans le cadre de déploiement de capteurs nous ont amené progressivement à penser au développement de nos propres outils de mesures. Dans le suivi d'espèces terrestres, nous avons développé un dispositif de communication sans fil pour la géolocalisation. Cet outil doit nous permettre de résoudre les problématiques identifiées précédemment : une longue portée de signal pour limiter le déploiement de stations de base, un dispositif peu gourmand en énergie pour favoriser une étude sur le long terme.

##### AMBLoRa

Une partie des travaux sur le suivi terrestre d'espèces vivantes s'est réalisée en collaboration avec le Parc Naturel Régional de la Corse (PNRC) pour le suivi de cerfs relâchés dans le milieu naturel. En effet, utilisant actuellement une méthode de traque active, les personnels du PNRC sont impactés par un processus de suivi chronophage et difficile à mettre en œuvre. Dans ce contexte, un prototype de dispositif de géolocalisation a été développé en collaboration avec la SITEC (société d'informatique localisée en Corse), utilisant la technologie de communication LoRa [35]. LoRa est une technique de modulation du signal radio, dans les bandes fréquences ISM (Industrial, Medical and Scientific) utilisant la fréquence 868 MHz en Europe, proposée par la société SemTech. Cette modulation utilise l'étalement de spectres pour transmettre des informations, afin que les dispositifs utilisant LoRa soient capables d'émettre sur un même canal en même temps. Cette technologie favorise des communications de très longue portée et très adaptées pour la télémétrie. La technologie LoRa utilise le protocole LoRaWAN. LoRaWAN est un protocole sur la couche de contrôle d'accès au support favorisant l'économie d'énergie des dispositifs déployés (en limitant leur temps d'émission) et proposant un cryptage des transmissions. Les réseaux LoRaWAN ont généralement des topologies en étoile dans lesquelles des passerelles reçoivent des données d'objets connectés, puis transmettent ces messages à un serveur réseau central. Le serveur réseau central achemine les paquets vers les serveurs d'applications qui lui sont associés comme illustré sur la Figure 42.

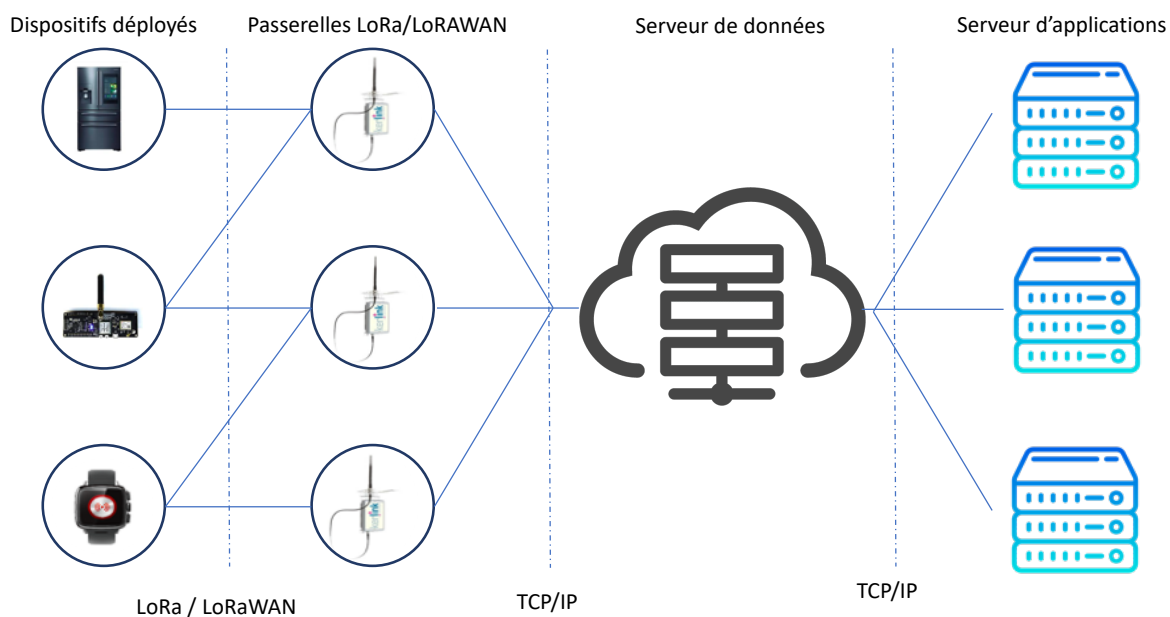


Figure 42 : Architecture d'un réseau LoRa/LoRa WAN

Le protocole LoRaWAN définit 3 classes d'équipements (A, B et C).

- Classe A : cette classe a la consommation énergétique la plus faible. Lorsque l'équipement a des données à envoyer, il le fait sans contrôle, puis il ouvre deux fenêtres d'écoute successives pour des éventuels messages provenant du serveur ; les durées recommandées sont de 1 puis 2 secondes. Ces deux fenêtres temporelles sont les seules durant lesquelles le serveur peut envoyer à l'équipement les données qu'il a précédemment stockées à son attention.
- Classe B : cette classe permet un compromis entre la consommation énergétique et le besoin en communication bi-directionnelle. Ces équipements ouvrent des fenêtres de réception à des intervalles programmés par des messages périodiques envoyés par le serveur.
- Classe C : cette classe a la plus forte consommation énergétique mais permet des communications bi-directionnelles n'étant pas programmées. Les équipements ont une fenêtre d'écoute permanente.

Pour le suivi d'animaux terrestres, nous avons élaboré un dispositif de géolocalisation utilisant la technologie LoRa appelé AMBLoRa[36] illustré par la Figure 43.

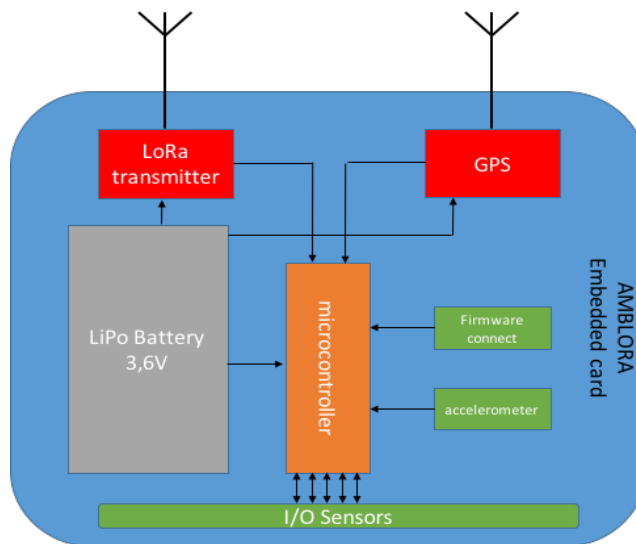


Figure 43 : Schéma de composants de AMBLoRa

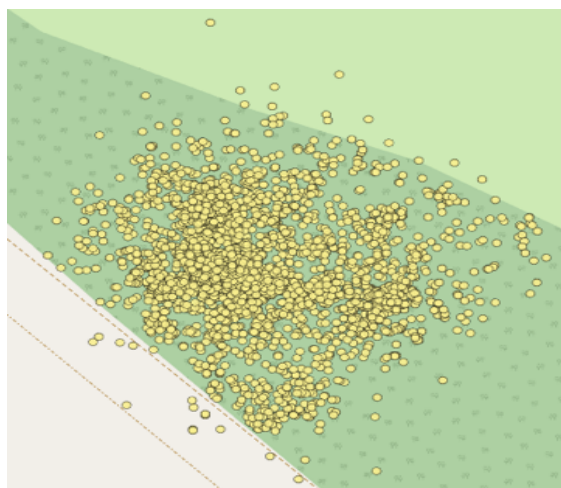
Ce dispositif reprend les éléments d'un capteur sans fil (cf. Figure 3) utilisant un outil de communication avec une modulation de fréquence LoRa, intégrant un GPS et un accéléromètre (I/O Sensors). Cet ensemble est positionné dans un boîtier et a été posé sur le cou d'un cerf comme illustré sur la Figure 44. Le cerf a été relâché dans un enclos d'une dizaine d'hectares pour nous permettre de valider le fonctionnement de notre dispositif.



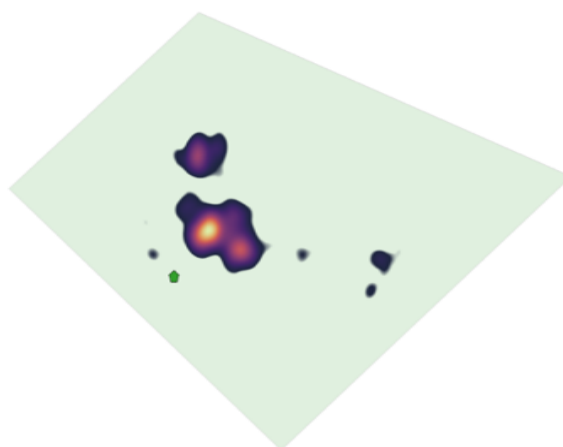
Figure 44 : (a) Cerf équipé du dispositif AMBLoRa (b) Passerelle Kerlink LoRa

L'ensemble des données collectées sont renvoyées vers une passerelle LoRa Kerlink alimentée par une batterie couplée à un panneau solaire (dans le souhait d'une alimentation autonome), comme nous avons pu le faire sur d'autres déploiements (cf.2.5). Cette passerelle transmet les informations de AMBLoRa vers des serveurs de données par le biais de transmission de données cellulaires (3G).

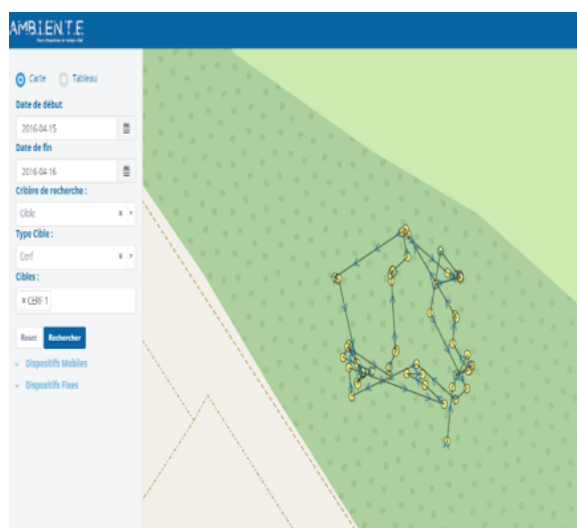
La SITEC a développé un outil de visualisation de données en intégrant les données GPS renvoyées par AMBLoRa. L'outil permet de visualiser un ensemble de résultats comme montré sur la Figure 45.



(a) : Nuage de positions GPS envoyées par AMBLoRa



(b) : Carte de chaleur des positons du cerf



(c) Tracé et direction du parcours du cerf

Figure 45 : Résultats de géolocalisation de AMBLoRa sur le suivi du cerf

Les résultats obtenus ont été très satisfaisants et ils ont permis de répondre aux objectifs fixés de suivi d'un cerf dans son milieu naturel. Cependant, nous pouvons souligner un certain nombre de limites à cette étude.

Les tests ont été réalisées dans un site plat avec peu de végétation ; ces résultats méritent d'être confrontés à des tests en milieu de végétation dense, plus montagneux correspondant aux reliefs corses.

Nous nous sommes également positionnés, lors ces tests, dans une simple utilisation de communication avec la technologie LoRa, sans appliquer le protocole LoRaWAN. Même si les premiers relevés de consommation énergétique sont apparus satisfaisants, il serait intéressant de positionner nos dispositifs dans une intégration du protocole LoRaWAN en classe A.

Le développement et la maintenance d'un tel dispositif nécessite une expertise et un temps important; la vision de AMBLoRa (au début de développement) avec l'utilisation de la technologie LoRa couplée à de la géolocalisation GPS était pertinent. Cependant, l'arrivée sur le marché d'outils plus petits, disposant des performances identiques, nous ont conduit à mener une réflexion et une comparaison de performances de produits « sur étagères ».

#### Tests et développement de microcontrôleur Python

Suite aux conclusions précédentes, nous avons décidé de mener une série d'études comparatives de performances de dispositifs utilisant LoRaWAN. Pour nous permettre de progresser dans notre approche d'un dispositif pour le suivi du vivant terrestre, nous avons choisi de réaliser nos tests sur un ARDUINO REV3 et un dispositif utilisant un microcontrôleur LoPy4 en micropython de la société PyCom.

Arduino est une marque très populaire de cartes de prototypage sur lesquelles se trouve un microcontrôleur. Le microcontrôleur peut être programmé pour analyser et produire des signaux électriques, de manière à effectuer des tâches très diverses, souvent dans le cadre de la domotique, du pilotage d'un robot, de l'informatique embarquée. Couplé à la carte de prototypage, une carte d'extension Dragino LoRa/GPS a été fixée, disposant de composants pour la technologie LoRa/LoRaWAN et le GPS. La partie de LoRa est basée sur l'émetteur SX1276/SX1278 et la partie GPS utilise le module Quectel L80.

LoPy4 est une carte de développement compatible avec MicroPython. Elle dispose de composants pour utiliser les réseaux LoRa, Sigfox, WiFi et Bluetooth. Cette carte fonctionne avec des programmes codés en MicroPython (dialecte pour microcontrôleur du Python). Les cartes de la société Pycom

fonctionnent avec une implémentation de Python 3.5 optimisée pour tourner sur des microcontrôleurs. La carte PyTrack est une extension des cartes Pycom ; elle dispose entre autres, d'un accéléromètre, d'un module GPS L76-L de Quectel et d'un port micro-SD. Les tests comparatifs ont permis de valider le choix de la technologie proposée par PyCom pour la précision des coordonnées des données GPS renvoyées, sa taille (55mm x 20 mm x 3,5 mm), son poids inférieur à 100g, sa composition matérielle dans un esprit semi-industriel.

Nous nous sommes concentrés sur l'amélioration des algorithmes de gestion du GPS des Pycoms pour augmenter la précision et gérer la consommation énergétique. Pour cela, nous nous sommes appuyés sur l'algorithme d'origine (A0) et nous avons proposé deux nouvelles versions optimisées de l'algorithme selon des critères de précisions (A1) et de consommation énergétique (A2). Différents tests en fonction de différents parcours (itinéraire témoin en laboratoire : I0 ; ville : I1, périurbain : I2, sous-bois : I3) ont été réalisés. Les résultats sont illustrés par les Figure 46, Figure 47, Figure 48.

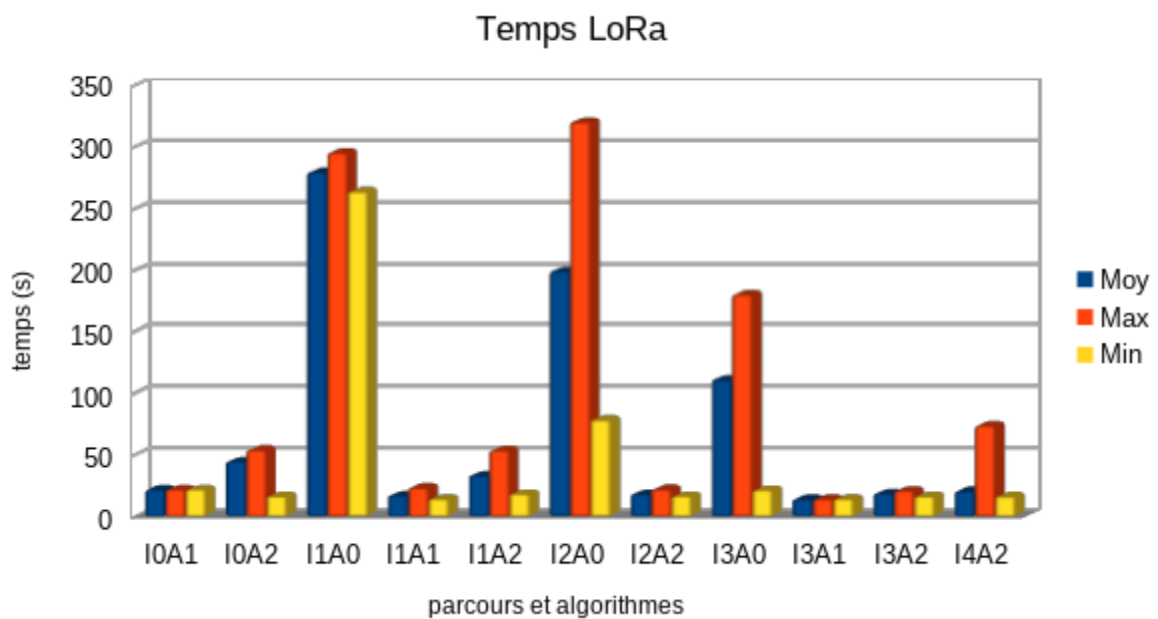


Figure 46 : Temps de sollicitation du module LoRa durant les phases de communication des 3 algorithmes selon différents parcours



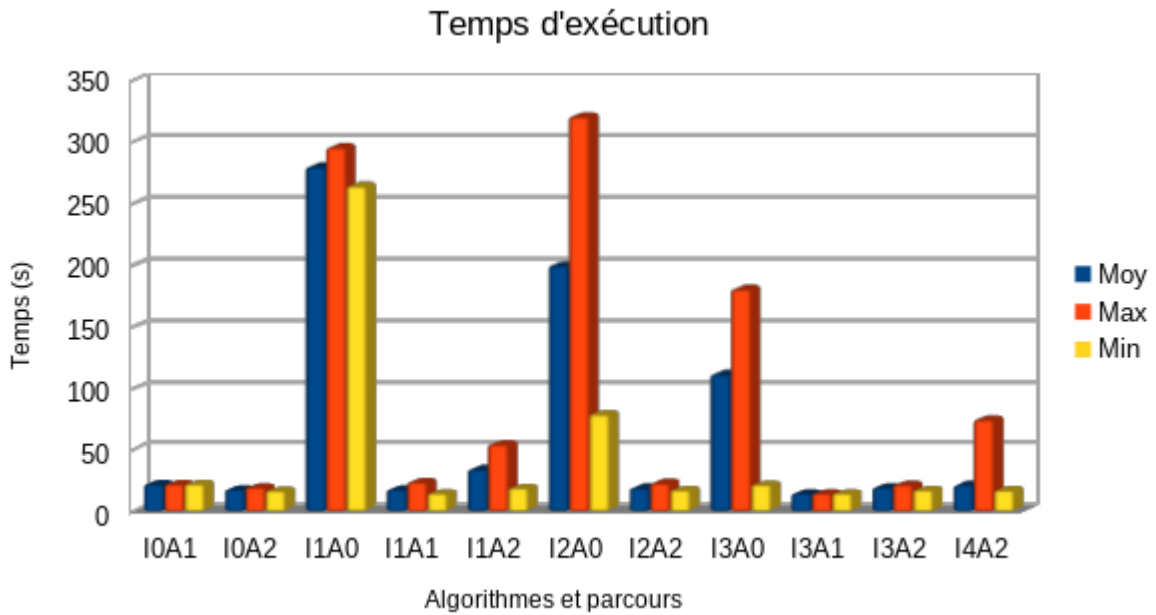


Figure 47 : Temps d'exécution d'un algorithme en fonction des différents parcours

La Figure 48 montre les consommations moyennes des algorithmes A0, A1 A2 pour les cas « moyen », « favorable » et « défavorable ». On définit un cas favorable comme celui où l'on reçoit les positions GPS (sans avoir à télécharger les éphémérides liées), et un cas défavorable comme celui où l'on ne reçoit pas de position. On constate que l'algorithme A1 est plus énergivore que A0, ce qui est une conséquence attendue de l'utilisation excessive du GPS. Les consommations pour l'algorithme A2, qui réduit le temps d'utilisation du module GPS au minimum, sont visiblement meilleures que les consommations des deux autres algorithmes, en particulier pour le cas défavorable [37].

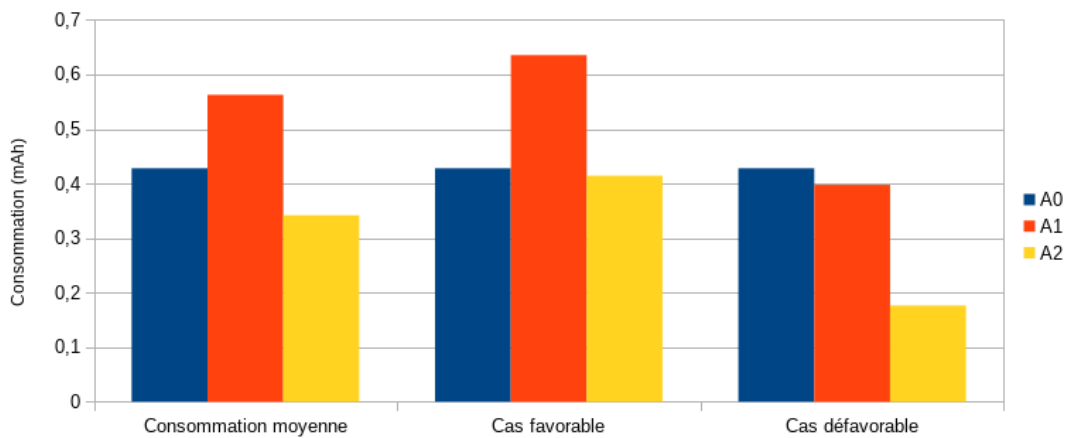


Figure 48 : Consommation énergétique selon les 3 algorithmes comparée

Notre développement a donc intégré l’algorithme A3 et des tests complémentaires de notre dispositif ont été réalisés en parcours montagneux. Les résultats sont présentés sur la Figure 49. Nous pouvons voir que les tracés GPS renvoyés valident la qualité de géolocalisation de notre dispositif sous un couvert végétal assez dense.

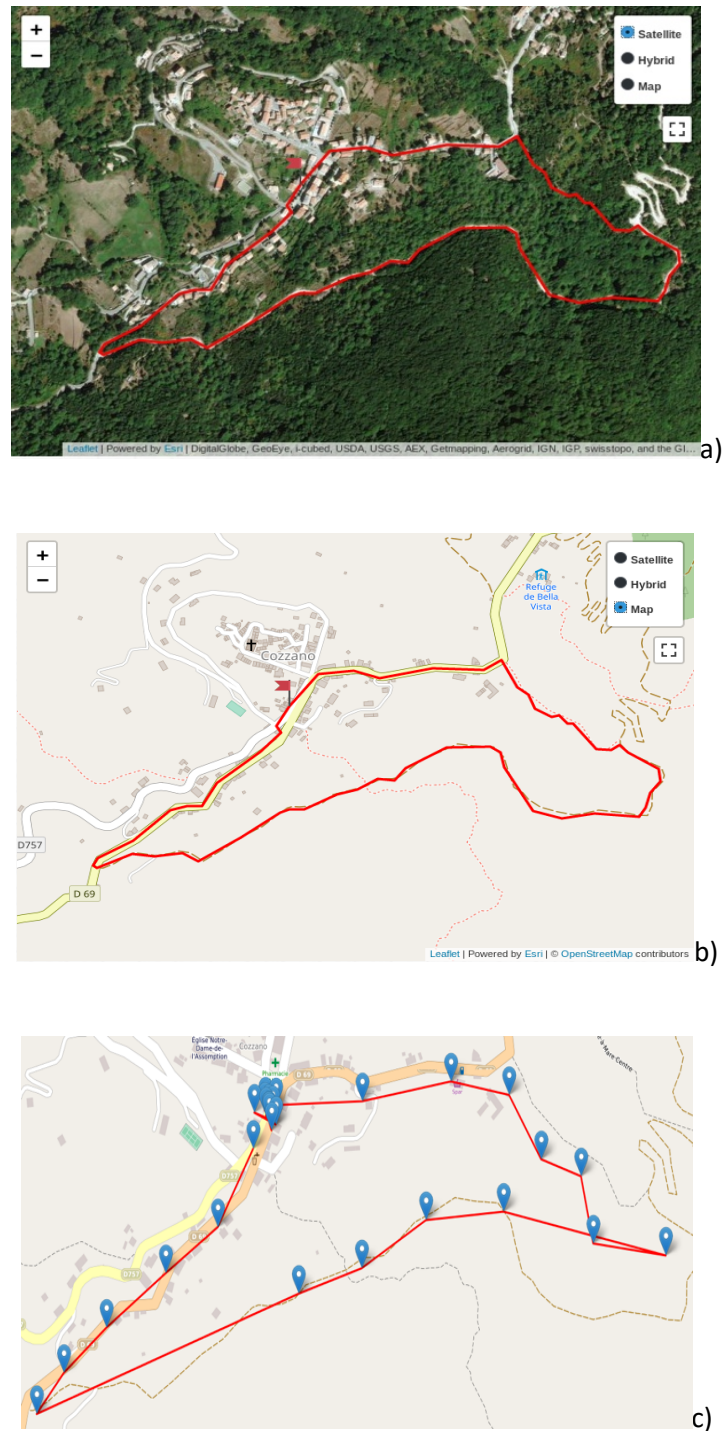


Figure 49 : Tests en parcours montagneux a) vue satellite du parcours, b) vue en plan du parcours, c) résultats reportés des positions PyCom

En parallèle, nous avons développé un support en silicone souple pour être porté par les animaux montré sur la Figure 50.



*Figure 50 : Collier en silicone avec LoPy4 - PyTrack*

## 2.7 Conclusion

Les travaux menés dans la caractérisation de RCSF nous ont conduit à développer un ensemble de bibliothèques de modèles pour la simulation et l'optimisation pour de l'aide au déploiement dans le cadre de le suivi environnemental. Les études menées nous ont également permis d'identifier des problématiques relatives à l'utilisation de tels dispositifs dans le suivi de phénomènes environnementaux et le suivi d'espèces vivantes. Le passage au déploiement réel a été nécessaire pour conforter nos hypothèses et pouvoir tester des dispositifs. Ces travaux ont contribué au développement d'une nouvelle compétence scientifique au sein du laboratoire sur le déploiement des réseaux de capteurs sans fil au service de l'instrumentation scientifique dans différents projets. Ils ont également permis de mettre en lumière la possibilité de collecter de nombreuses données rapidement et de pouvoir en extraire, quasiment en temps réel, des informations relatives à l'observation de systèmes.

Ces données révèlent un potentiel important dans le cadre d'un traitement, d'une analyse pour une appréhension plus complexe d'un système observé et de son évolution. Nous verrons dans une seconde partie comment nous essayons d'intégrer l'ensemble des concepts et dispositifs développés à une notion plus globale d'intelligence ambiante.

### 3 L'intelligence ambiante

Cette partie présente le chemin scientifique naturel qui a permis d'amener une réflexion plus large autour de systèmes ubiquitaires intégrant des systèmes embarqués couplés à de l'apprentissage automatisé pour de la prédiction de comportement de systèmes physiques ou vivants. Ce chapitre présente dans un premier temps, un nombre certain de concepts autour de la notion d'intelligence ambiante, et dans un second temps, la contribution de travaux en cours liés à cette thématique et les perspectives ouvertes par ces recherches.

#### 3.1 Introduction aux concepts

En intégrant la prédiction de Weiser [38] de la fin des années 90 sur l'évolution affirmée vers des environnements densément peuplés de ressources informatiques souvent communicantes, nous voyons apparaître une notion nouvelle d'intelligence ambiante, terme qui a émergé au début des années 2000 sous l'impulsion des travaux de Augusto Wrede [39].

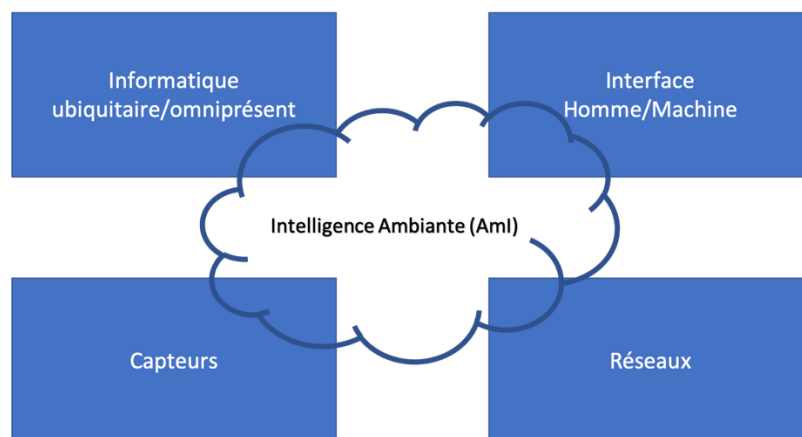


Figure 51 : Représentation du concept d'intelligence ambiante par A. Wrede[39]

Selon A. Wrede, une nouvelle typologie d'environnement émerge se basant sur quatre piliers illustrés par la Figure 51 :

- Les systèmes informatiques omniprésents, intégrés, ubiquitaires venant réaliser de nombreuses tâches complexes.
- Les réseaux filaires ou sans fil, déployés, robustes, résilients qui assurent une connectivité permanente.
- Des capteurs qui perçoivent l'environnement à différentes échelles.

- Les interfaces homme-machine, qui permettent à des utilisateurs de visualiser des données et/ou contrôler les dispositifs électroniques ou informatiques déployés dans un environnement.

Dans un rapport d'expertise [40] réalisé pour le Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche, un ensemble d'éléments précise que « l'intelligence Ambiante » est l'amélioration, voire l'augmentation du monde réel pour offrir un tout adapté en toute circonstance à l'Homme ». Au regard de l'informatique traditionnelle, l'évolution va vers des systèmes capables d'améliorer le bien-être de l'individu, de la société, en visant une sauvegarde des ressources et de la planète. L'intelligence ambiante peut-être associée au terme de l'informatique ubiquitaire (*ubiquitous computing*) ou de l'informatique pervasive ou diffuse (*pervasive computing*), qui s'est affirmée comme une nouvelle thématique scientifique, il y a une dizaine d'années.

Nous observons également la popularisation récente des outils d'**intelligence artificielle** (apprentissage automatique, apprentissage profond...) avec une médiatisation croissante autour des sujets d'application qui en découlent. Cela amplifie la transition numérique en cours qui peut s'apparenter à **une transformation de rupture** du monde actuel. Ces outils utilisent des données brutes pour construire des connaissances exploitables en remplaçant la programmation explicite par des développeurs humains par un apprentissage automatique à partir d'un grand ensemble de données. L'avènement des outils d'intelligence artificielle s'inscrit dans une **complémentarité** et une **maturité** dans d'autres domaines technologiques comme l'Internet des Objets (IdO) ou le stockage, l'indexage et l'accessibilité à d'immenses bases de données.

L'ère du numérique ubiquitaire, qui succède à celle de l'ordinateur central et de l'ordinateur personnel, bouleverse l'environnement. Nous pouvons constater que de nos jours, de nombreux appareils embarquent ainsi un petit supplément d'intelligence, et bénéficient par ailleurs d'une connectivité performante sans fil pour transmettre des informations de manière fiable et sécurisée. Cette **omniprésence de la technologie** est avérée, et va s'affirmer de plus en plus dans les années à venir. La **convergence de trois mondes**, **l'intelligence artificielle**, les **réseaux de communication sans fil haut débit** et le **Big Data** conduit à la création d'une intelligence ambiante décentralisée, intimement mêlée aux objets qui nous entourent, sensible et capable de créer, du point de vue des utilisateurs, un univers réactif et attentionné à leur présence et à leurs besoins. **L'Informatique pervasive** a été envisagée par Weiser comme la troisième ère de l'informatique moderne, dans laquelle l'utilisateur est confronté à une multitude d'ordinateurs sans fil communiquant entre eux discrètement[41]. L'intérêt de l'informatique pervasive tient aux capacités de mobilité et d'intégration des systèmes numériques

dans le milieu physique au point de s'y confondre, et ceci de manière spontanée, à de multiples échelles.

L'intelligence ambiante a donc pour vocation de fournir de nouveaux services à la société de manière générale. Un service peut être défini comme une assistance fournie à un être vivant, par exemple, offrant une fonctionnalité offerte à un tiers. L'objectif serait d'aboutir à des « technologies génériques, facilitantes et façonnables dans un monde hétérogène, contraint, dynamique et multi-échelle »[40] en inventant les concepts, les modèles, les technologies et les méthodes pour :

- des services autonomes, voire émergents, mais maîtrisés ;
- des services sûrs, fiables et sécurisés ;
- des services intelligents ;
- des services interagissant avec l'utilisateur de manière adaptée ;
- des services respectant des valeurs éthiques.

Un tel concept, agrégeant autant de promesses autour des services rendus à la société et aux humains, peut trouver un écho au sein de zones regroupant des humains ; comme les villes et en particulier les villes intelligentes.

La **ville intelligente**, ou Smart City, place le citoyen au cœur de sa stratégie de développement grâce, notamment, à des infrastructures informatiques robustes (système d'informations, communication, stockage, sécurité, réactivité, réseaux de capteurs...) et à la création de services numériques, participatifs et inclusifs. Son objectif permanent consiste à maîtriser ses ressources naturelles, énergétiques, humaines et économiques. Cette nouvelle trajectoire est affichée depuis plusieurs années par de grandes villes européennes comme Amsterdam, Londres, Stockholm, Barcelone, Paris, Manchester, Padoue, ou encore Santander [42][43]. Cependant, l'hétérogénéité des histoires et des situations interroge sur la mise en œuvre de cette ville intelligente qui apparaît dans certains cas comme une réalité partielle, parfois comme une simple volonté marketing et bien trop souvent comme une utopie [44]. Au cours des deux dernières décennies, l'évolution des villes a été marquée par une place toujours plus importante des technologies de l'information et de la communication exerçant une influence permanente et généralisée [45] sur le développement de l'ensemble de la cité. Le terme «ville intelligente» a été défini de diverses manières dans la littérature, mais l'on peut retrouver deux grands axes de définitions :

- d'une part, la notion de «ville intelligente» faisant référence à la mesure croissante dans les lieux urbains [46] grâce à l'informatique ubiquitaire et à l'omniprésence de dispositifs numériques intégrés dans l'environnement urbain (réseaux de communications filaires et sans fil, services publics utilisant le numérique, infrastructures de transport, réseaux de capteurs et de caméras, systèmes de gestion de bâtiments, etc.) utilisés pour surveiller, gérer et réguler les flux urbains, les divers processus, souvent en temps réel ; l'informatique mobile est incluse (par exemple, les téléphones intelligents) car elle est utilisée par de nombreux citoyens pour interagir et naviguer dans la ville avec une production de données sur les usages (emplacement, activité, etc.)
- d'autre part, la notion de "ville intelligente" se réfère plus largement au développement d'une économie de la connaissance dans une ville-région [47]. De ce point de vue, une ville intelligente intègre une gouvernance pilotée par l'innovation, la créativité et l'esprit d'entreprise. Les technologies de l'information et de la communication sont perçues comme un élément central, en tant que support de mobilisation et de réalisation des idées et des innovations, notamment en ce qui concerne les services aux citoyens et aux entreprises.

Cependant, ces questions sur les villes intelligentes excluent les territoires plus petits, plus ruraux qui représentent de grande zone géographique. En effet, en France, 73 % du territoire est occupée par des communes de moins de 2000 habitants. Une étude de la Caisse des Dépôts [48] montre que les préoccupations en terme de développement des villages ne sont identiques à ceux des villes intelligentes, en termes de priorités, de besoins, d'espérances dans le défi planétaire que représente le changement climatique.

Dans ce contexte, l'Université de Corse, EDF SEI et la SITEC ont répondu conjointement à un appel à projet public-privé de recherche de développement en proposant un programme autour des villages intelligents. Je suis, depuis juillet 2017, le coordinateur scientifique d'un programme appelé ***Smart Paesi - Smart Village : émergence de territoires intelligents***[49][50].

La réflexion s'appuie sur notre capacité à collecter des données à l'aide de dispositifs connectés comme nous avons pu le voir dans la première partie. La remontée de données environnementales est essentielle et autorise ainsi la constitution de nouveaux systèmes d'information capables de percevoir un contexte pour l'observation d'un phénomène physique ou d'animaux, et d'utiliser ces données pour créer de nouveaux services tels que l'aide à la gestion des ressources, le pilotage d'infrastructures ainsi que la prédiction comportementale. Ce socle scientifique autour de l'instrumentation scientifique nous a amené à réfléchir à la constitution d'un système d'information pervasif pour le suivi du vivant, la surveillance environnementale et la prédiction comportementale. Le but d'un système

d'information pervasif (SIP) est de rendre accessible les fonctionnalités offertes par le SI à travers un environnement pervasif [41].

### 3.2 Contributions au développement de systèmes d'information pervasif pour le suivi environnemental

Comme nous avons pu le dire précédemment, il est assez complexe de définir un territoire intelligent tant les tentatives de définition sont nombreuses. En effet, les villes intelligentes utilisent les technologies récentes pour améliorer les conditions de vies par le biais d'informations collectées relatives à la vie des citoyens. Ces paramètres sont divers et peuvent concerner l'éducation, l'employabilité, les transports, la consommation énergétique, la santé, la qualité de l'air et de l'eau, la gestion des déchets et tous les types d'informations potentiellement bénéfiques à la qualité de vie des habitants.

Nous avons choisi de nous appuyer sur ces éléments de définition pour construire notre proposition du Smart Village. Sa description repose sur quatre éléments :

1. le développement durable,
2. les infrastructures informatiques/numériques,
3. l'éducation/e-citoyenneté ,
4. les activités agricoles.

Le site expérimental choisi est le village de Cozzano (Corse du Sud) qui a construit depuis une vingtaine d'années une stratégie sur le développement durable : chaufferie biomasse, microcentrales hydroélectriques, pour faire émerger un territoire à énergie positive (il produira plus d'énergie qu'il n'en consomme). Son développement économique et démographique est assez remarquable. C'est une commune qui fait partie de la haute vallée du Taravo en Corse du Sud et s'étend sur une superficie de 2 559 hectares. Exposée au nord, l'agglomération villageoise actuelle est implantée à environ 750 mètres d'altitude, et à 5 kilomètres du chef-lieu de canton, Zicavo. En 2019, la commune comptait 282 habitants, (en augmentation de 6,42 % par rapport à 2009).

Notre proposition de SIP [51] est organisée autour de grands blocs d'action : collecte, stockage, prédiction et visualisation comme montré sur la Figure 52.



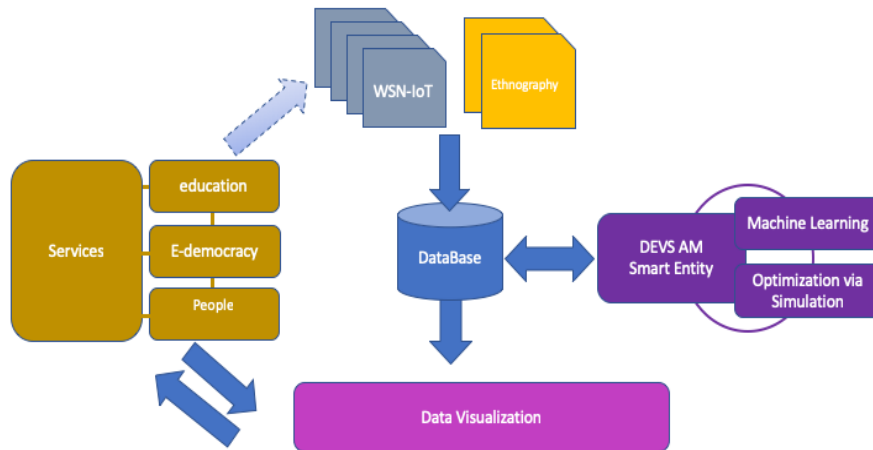


Figure 52 : Schéma simplifié de l'architecture

La collecte d'informations est automatisée par le biais du déploiement d'un réseau de capteurs sans fil. Une partie de la collecte est organisée autour de campagne d'enquêtes de terrain - ethnographiques pour disposer d'autres types d'informations. Le stockage des données est réalisé dans des serveurs de données à Bastia, dans le Datacenter de la SITEC. Les données sont utilisées pour une visualisation directe de celles-ci mais également pour de la prédiction à l'aide d'un modèle réalisant de l'apprentissage automatique. Les données prédites vont être également utilisées pour travailler sur de l'optimisation de systèmes. L'ensemble doit permettre de réaliser un outil d'aide à l'observation, à la décision, mais également d'autres services (e-démocratie, éducation, etc.). Nous allons détailler les différentes parties du système proposé.

### 3.2.1 Le RCSF utilisant LoRaWAN

Pour la collecte d'informations, nous nous sommes positionnés, dans un premier temps, dans le suivi des données environnementales globales du village dans le cadre d'un RCSF utilisant la technologie LoRa et son protocole LoRaWAN. En effet, les expériences précédentes nous ont conforté dans l'utilisation et le déploiement de cette technologie dans la télémétrie et le suivi de systèmes. Deux passerelles LoRa-3G ont été positionnées pour répondre à nos besoins : une au centre du village sur un point haut (le clocher du village) et une deuxième plus en retrait, sur le village de Ciamanacce (village voisin sur l'autre rive du fleuve Taravo) pour nous permettre de disposer d'une antenne de plus grande portée mais également de faire office de relais de secours.

Les dispositifs déployés sont de plusieurs ordres comme détaillé dans le Tableau 5 :

- Collecte de données environnementales extérieures (*Weather*) : 3 stations météo locales (pression atmosphérique, luminosité, température, humidité, pluviométrie orientation et vitesse du vent) – 2 stations de mesure de la qualité de l'air - 3 points de mesure sur la qualité de l'eau.
- Collecte de données intérieures de bâtiments communaux (*smart building*) : 8 points de collecte de la température, d'humidité et d'ouverture de portes.
- Collecte de données sur une exploitation biologique de safran (*smart agriculture*) : deux points de mesure sur l'humidité et la température du sol.
- Collecte sur un exploitation porcine en libre parcours (*smart farm*) données relatives à des données de géolocalisation grâce des capteurs PyComs positionnés sur des cochons.

L'ensemble des mesures est fourni par des capteurs spécifiques positionnés sur le village comme montré dans le Tableau 5. Ce parc d'objets connectés est complété par d'autres dispositifs :

- collecte de données anonymisées relatives aux consommations énergétiques du village grâce au partenariat avec EDF ;
- collecte des données de production de la centrale hydroélectrique et de la chaufferie biomasse de la commune.

Ces données numériques sont complétées par des enquêtes de terrain réalisées par des étudiants lors de semaines d'immersion sur le site expérimental.

L'ensemble de ces données sont stockées dans un *datacenter* de la SITEC positionné à Bastia. Ces données sont exploitées selon 2 axes :

- l'utilisation des données pour alimenter un modèle d'apprentissage-prédiction de l'évolution des systèmes appelé AM DEVS Smart Entity, pour réaliser des interactions avec l'IoT ;
- la visualisation des données selon des tableaux de bord pour les chercheurs, la municipalité et la population.

Nous allons essayer de préciser, en particulier, ce qui constitue l'intégration d'un modèle d'apprentissage.

Tableau 5 : Présentation des différents capteurs utilisés

Application	Type	Input	Precision	Operating temperature	Accuracy
Weather	Pyranometer	electricVoltage		-40°C to 70°C	spectral range 360 nm to 11200nm
Weather / Smart Building	Relative humidity	Numerical	antiradiation shelter	-40°C to 70°C	±2 to 4%
Weather / Smart Building	Temperature	Numerical	antiradiation shelter	-20°C to 60°C	(25°C) : ±0,3°C / (5° to 40°C) ±0,4°C / (-40° to 70°C) ±0,9°C
Weather	raingauge	counter		-20°C to 70°C	
Weather	wind (force and direction)	counter			wind speed accuracy ± 5% and wind direction ± 7%
Weather / Smart building	Pressure	electric voltage	0,15 to 1,15 Bar / Max value : 4 bar / sensibility 45mV/Kpa	0 to 85°C	0,2 Vcc
Smart buidling	door opening	electric voltage	magnetic aperture detector	-20°C to 70°C	
Smart agriculture	soil Temperature	Negative Temperature Coefficient		-30°C to 80°C	0,4°C
Smart agriculture	soil humidit	electric voltage	capacitive		±3%
Smart Water	PH	Serial Data Interface at 1200 baud	combined electrode (ph / reference) with special glass - reference Ag/AgCl, gel electrolyte (KCl) -		Measuring range (0-14ph)
Smart Water	redox	Serial Data Interface at 1200 baud	combined electrode (redox/reference), platinum tip / reference Ag/AgCl, Gel electrolyte (KCl)		resolution 0,1mV ; accuracy ±2 mV
Smart Water	dissolved oxygen	Serial Data Interface at 1200 baud	Optical measurement by luminescence	-10°C to 60°C	±0,1mg/L - ±0,1ppm ±1%
Air quality	ozone	Serial Data Interface at 1200 baud	detection threshold 0,02 ppm		
Air quality	fine particle	electric voltage	sensor by laser scattering	-20°C to 50°C	0.0 to 999,9 mg/m <sup>3</sup>

### 3.2.2 Proposition d'un modèle de prédiction intégré au SIP

Notre réflexion s'appuie sur la possibilité et le besoin de prédire l'évolution de comportements de systèmes observés. Dans notre contribution au développement d'intelligence ambiante, il apparaît essentiel de pouvoir disposer d'un environnement qui collecte des informations sur système, utilise ces données pour prédire l'évolution et interagir pour corriger certains paramètres. En s'appuyant sur les travaux menés sur l'optimisation de systèmes, nous avons proposé une architecture de modèles DEVS [52] représentée par la Figure 53, dont l'objectif est l'optimisation de données prédites par le biais de phases de simulation, mais également d'interaction avec des objets connectés.

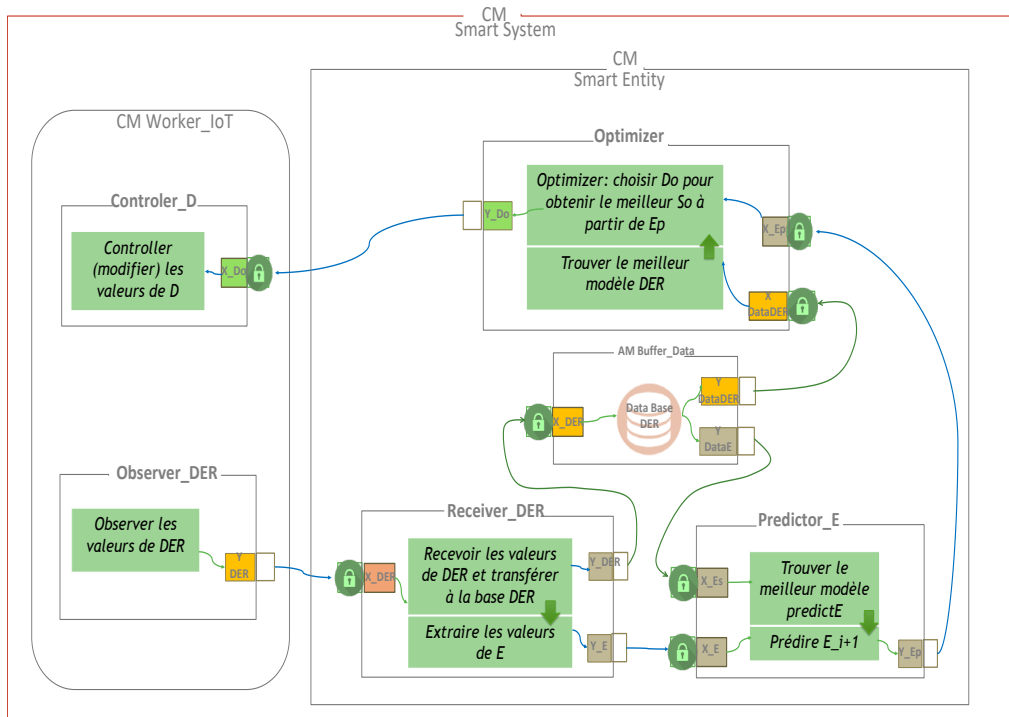


Figure 53 : Modèle Couplé DEVS Smart System pour la prédiction et l'optimisation par la simulation

Nous avons fait le choix de déviser notre approche en deux parties :

- a) un modèle couplé DEVS Worker\_IoT qui fait le lien entre la captation physique en lecture/observation de données et la rétroaction/contrôle des dispositifs déployés. Les données sont regroupées selon trois catégories : des données environnementales (E) collectées, des résultats de simulation (R), des données décisions (D) issues de processus d'optimisation du modèle couplé DEVS Smart\_Entity.
- b) un modèle couplé DEVS Smart\_Entity dont l'objectif est de produire des données simulées de prédictions et de résultats d'optimisation du trio de données DER. Le modèle doit prédire des valeurs de résultat (R) à partir des valeurs environnementales et décisionnelles (E et D). Nous appelons cela le problème de prédiction DER ( $DE \rightarrow R$ ). Nous devons optimiser les valeurs D à partir des valeurs prédites E pour obtenir la valeur R maximale possible selon un processus d'optimisation.

Le modèle couplé Smart Entity propose 3 phases :

- 1- une phase d'extraction et de toilettage des données selon le trio DER par le biais du modèle atomique Receiver\_DER . Cette phase de traitement est nécessaire et nous aide à reconstruire certaines données environnementales manquantes (rupture de communication par exemple).

- 2- une phase de prédiction utilisant les données environnementales E et un certain nombre d'algorithmes traditionnels de régression linéaire pour réaliser des prédictions. Pour favoriser une approche générique, les algorithmes d'apprentissage sont mis en concurrence pour déterminer le plus performant selon un jeu de données. La performance est calculée selon un score fourni selon le calcul de l'erreur quadratique moyenne (Mean Squared Error (MSE)). La MSE mesure la moyenne des carrés des erreurs, c'est-à-dire la différence moyenne au carré entre les valeurs estimées (réelles) et ce qui est estimé (valeurs prédites). Le choix de cet indicateur s'est fait pour débiter et valider notre approche ; il apparait comme l'un des plus populaires. L'algorithme d'apprentissage avec le meilleur score est retenu pour construire la prédiction. Ce processus sera relancé tous les 1000 enregistrements de données (valeur déterminée de manière arbitraire). Il est à noter que les algorithmes sont mis en concurrence dans une phase de simulation parallèle. Nous verrons par la suite comment cela impacte les performances de calcul.
- 3- une phase d'optimisation qui a pour objectif de trouver la meilleure variable de décisions D possibles dans un ensemble de valeurs prédites (Ep) et de résultats attendus (R). Cette phase s'appuie sur des algorithmes d'optimisation.

### 3.2.3 Résultats de prédiction

Dans cette partie, nous abordons les premiers résultats obtenus [37][53]. Ceux-ci sont de différents types et leur l'objectif principal est de valider notre approche. En effet, nous souhaitons que notre SIP dispose d'un modèle de prédiction qui puisse fournir des valeurs décisionnelles selon des prédictions. Nous disposons de tests de performance, c'est-à-dire qu'en fonction d'un jeu de données environnementales utilisées par nos différents algorithmes, le modèle propose un score (valeur MSE) pour chacun, comme illustré sur la Figure 54. Dans notre modèle, l'algorithme le plus performant (avec le score le plus élevé) sera utilisé pour la prédiction.

Les données observées (E), prédites (R) et optimisées (D) sont utilisées dans des processus d'optimisation comme représenté sur la Figure 55 où une valeur optimale de décision est recherchée dans un ensemble de valeurs prédites de résultats, des données observées/collectées. Une valeur décisionnelle est alors proposée.

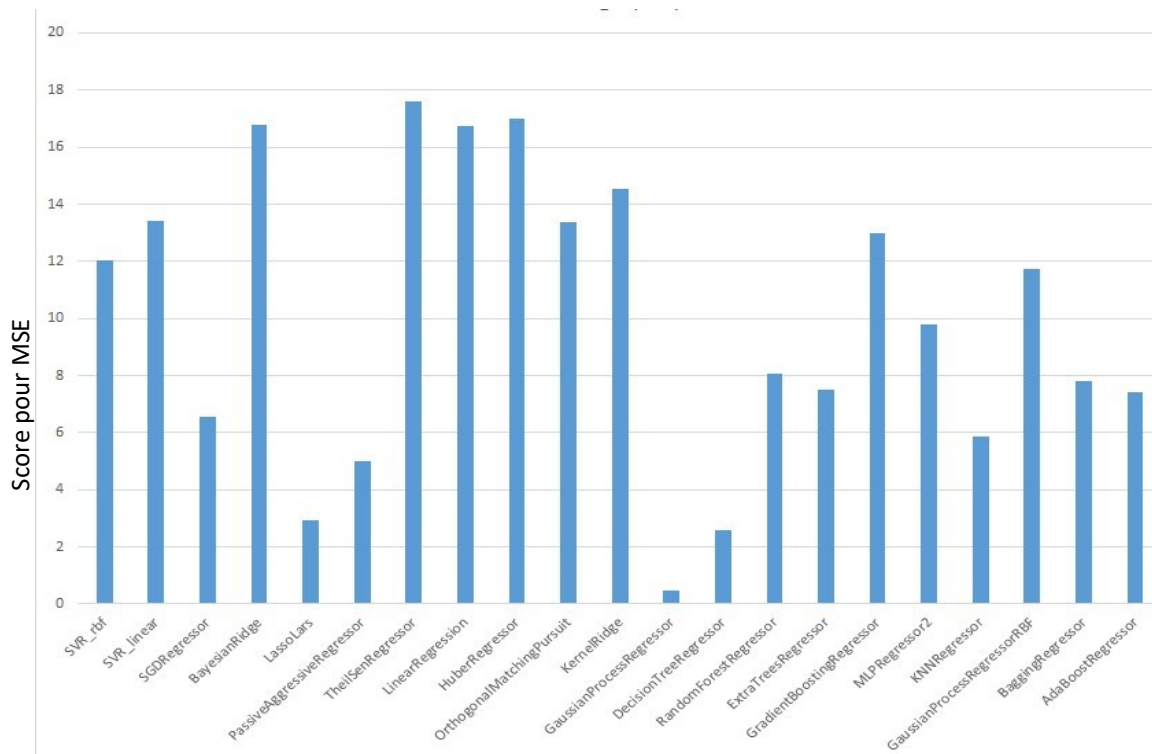


Figure 54 : Performances d'algorithmes selon un score affecté au MSE

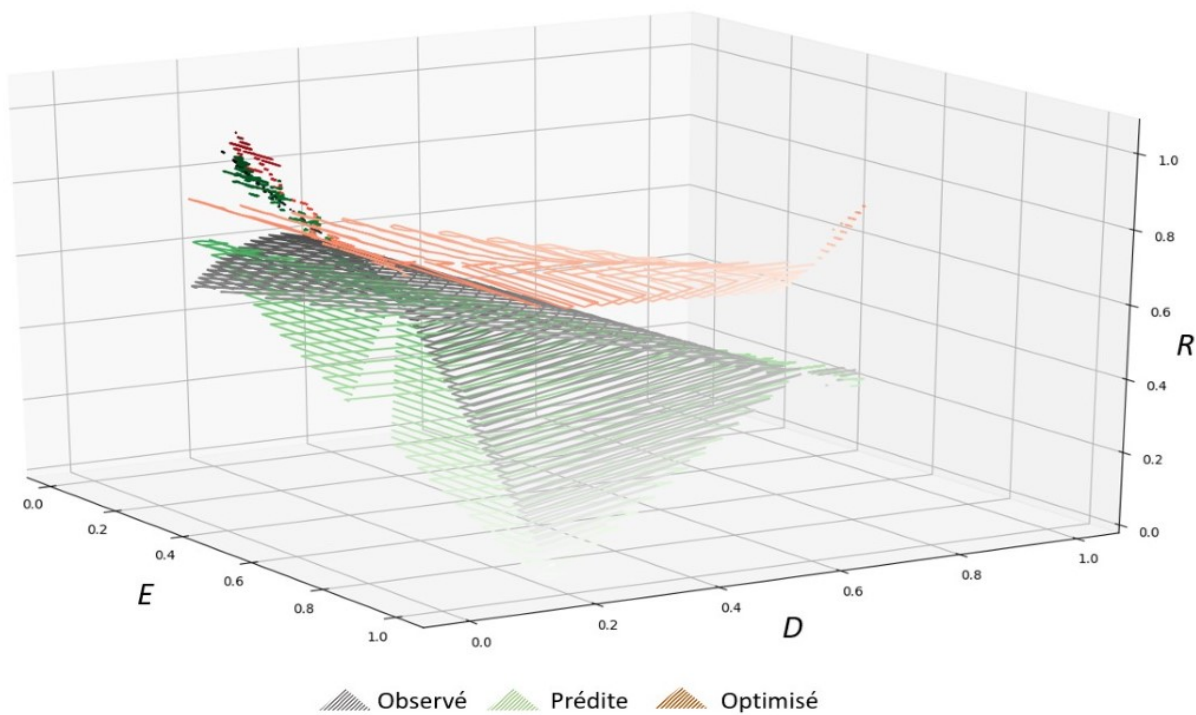


Figure 55 : Recherche de valeurs optimisées entre des données observées (E), prédites (R) et décisionnelles (D)

L'un des enjeux est également la capacité du modèle à prédire à long terme l'évolution des systèmes. Cette phase nous a imposé une réflexion autour de la possibilité de réaliser des simulations sur la base de données prédites. Pour cela, nous avons évalué deux approches pour la prédiction :

- a) une première approche proposée est de construire un ensemble de données prédites (30, 60, 120, 180 jours) en s'appuyant sur une série de données réelles de plusieurs grandeurs (de 30 à 720 jours) comme montré sur la Figure 56 ;
- b) une deuxième approche proposée est de construire la prédiction en utilisant une reconstruction de la base de données quotidienne, illustré par la Figure 57.

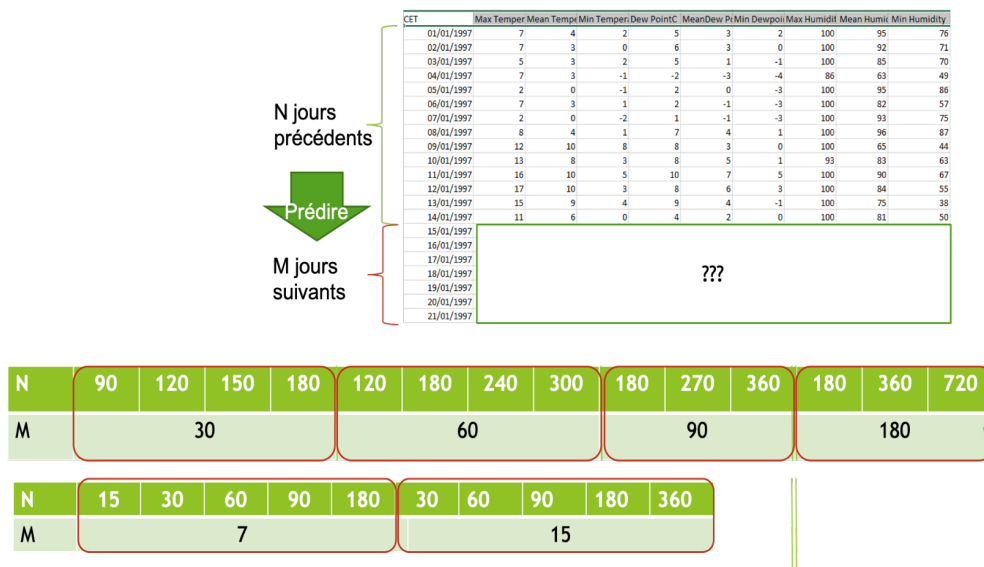


Figure 56 : Méthode de prédiction en appui sur une base de données existantes (Approche 1)

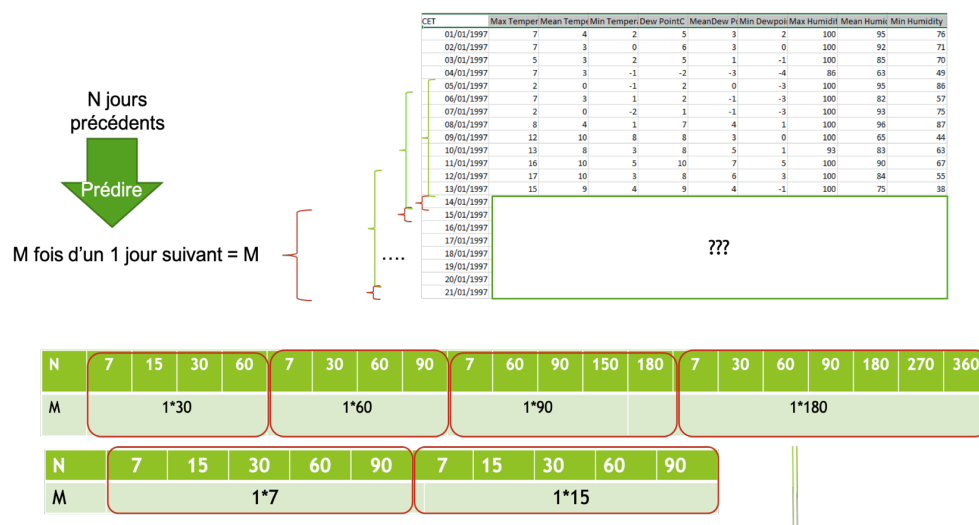


Figure 57 : Méthode par reconstruction de la série de données quotidiennes (Approche 2)

Les premiers résultats nous orientent vers l'intégration de l'approche 1 (App1), qui nous fournit des résultats de prédiction plus proches du réel que l'approche 2 (App2), comme illustré sur la

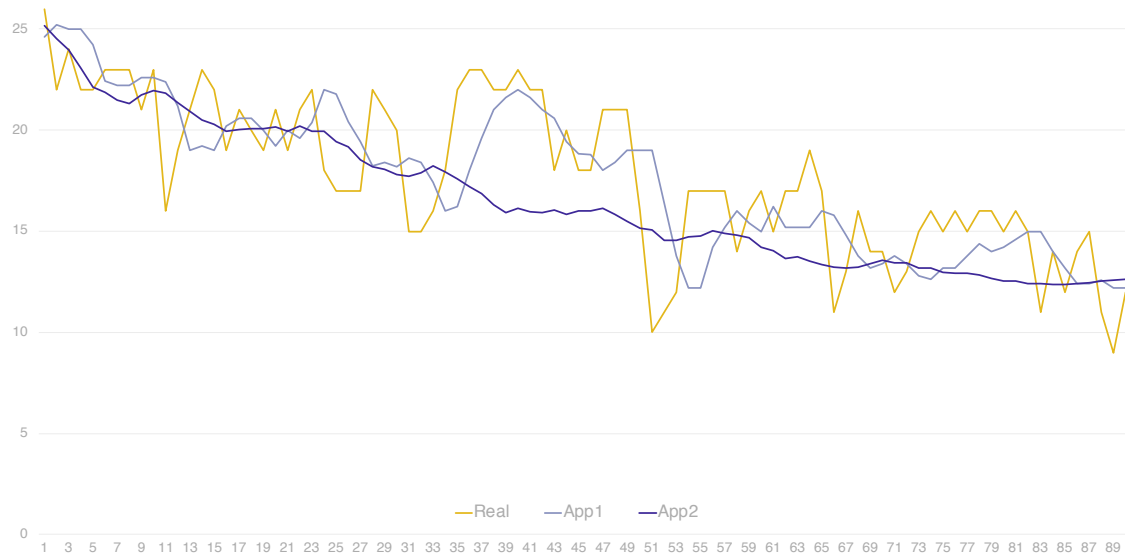


Figure 58. En effet, la courbe App2 offre la représentation d'une tendance dans un comportement général, mais elle ne peut en aucun cas proposer une prédiction juste au regard de l'écart avec la courbe *Real*. La courbe App1 est plus proche dans la prédiction mais présente un écart dans le temps, qui doit être ajusté.

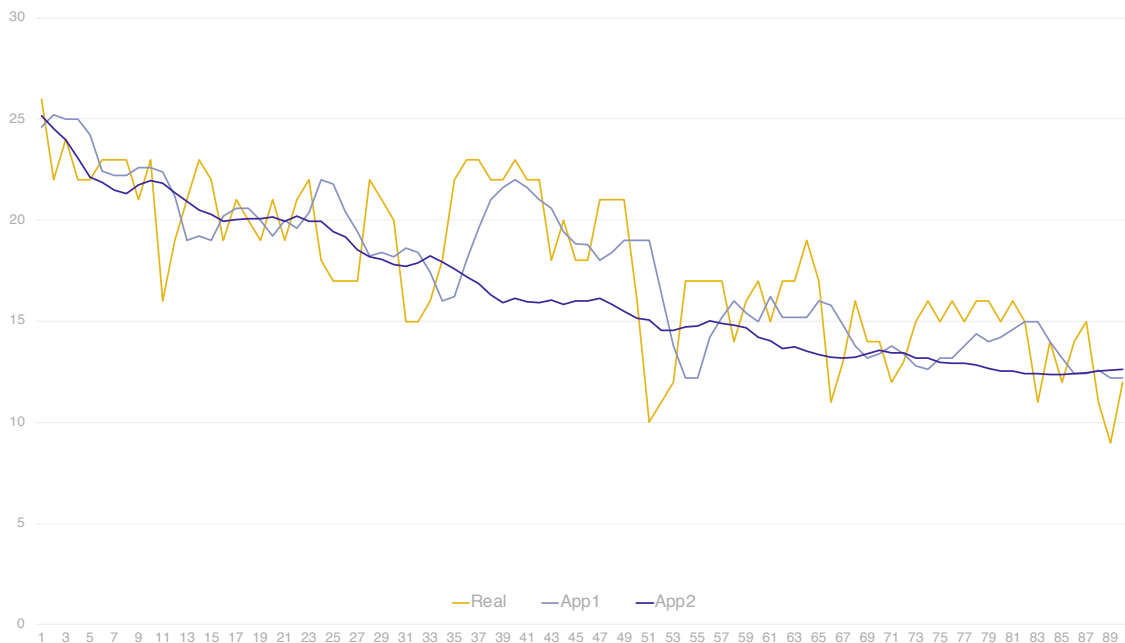


Figure 58 : Tests de prédiction de température sur de longues périodes (Jours) selon Approche 1 et Approche 2.



Cette première étude nous a amené à rapidement questionner les performances de notre SIP, relatives à la vitesse de traitement de l'information et de production des prédictions. En effet, nous pouvons imaginer qu'un village aura différentes problématiques (eau, la pollution des eaux, les déchets, pollution de l'air, agriculture, etc) à observer/gérer, et différents modèles DEVS *Smart Entity* seront probablement nécessaires pour réaliser les prédictions et générer les bonnes valeurs de décision. Nous considérons qu'il ne peut y avoir d'intelligence ambiante si le temps de calcul est trop important et que les résultats de prédiction sont en décalage avec la décision. Les premiers tests menés ont montré d'importants temps de simulation, et nous ont contraint à distribuer notre modèle sur le calculateur haute performance de l'Université di Corsica. Le temps de simulation pris par un modèle simulé sur un PC ou sur un nœud de super calculateur est acceptable. Mais ces temps commencent à devenir trop importants s'il y a plusieurs systèmes simulés en parallèle, comme montré sur la Figure 59. Ces résultats nous poussent à devoir intégrer cette notion de temps de simulation en proposant, par exemple, un service dans le cloud ou en basculant vers du *edge computing* avec une relative capacité de calcul.

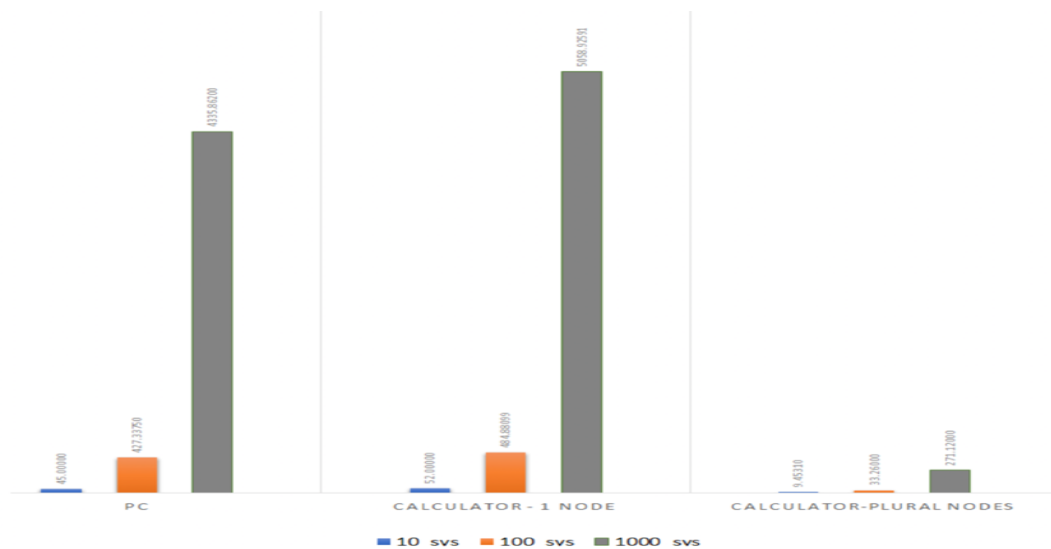


Figure 59: Test de performances de 10, 100 et 1000 modèles Smart Entity en parallèle

### 3.2.4 La gestion des données

Il est apparu au fil du développement du système est tout un ensemble de problématiques autour du stockage des données. En effet, la mise en œuvre récente du Règlement Général de Protection des Données (RGPD) nous impose un certain nombre de précautions relatives au stockage d'informations, en particulier dans la collecte des données personnelles, mais également dans celles provenant

d'objets connectés. Dans le cadre de la thèse de M Marcelo Nuvoli<sup>4</sup>, la question de la gestion de ces données est apparue prégnante pour deux cas précis :

- la collecte de données anonymisées des compteurs numériques EDF – comment rendre cette donnée disponible sans que cela ne soit manipulable par un tiers à des fins non souhaitées ;
- l'apparition de canal auxiliaire ou « *side channel* » relative à la collecte de données environnementale et l'apparition d'une signification, non souhaitée. Pour exemple, représentée dans la Figure 60, nous avons besoin de savoir si les changements de température étaient produits par l'ouverture ou non de la porte principale de la pièce. Cependant, une information non souhaitée est apparue, en particulier les horaires de fermeture et d'ouverture des locaux administratifs. Sur la Figure 60, nous voyons les jours d'ouverture (6 et 7 Aout) et les jours fermés (fête patronale, congés annuels de l'employé de mairie). Nous pouvons déceler les heures d'arrivée et de fermeture des locaux.

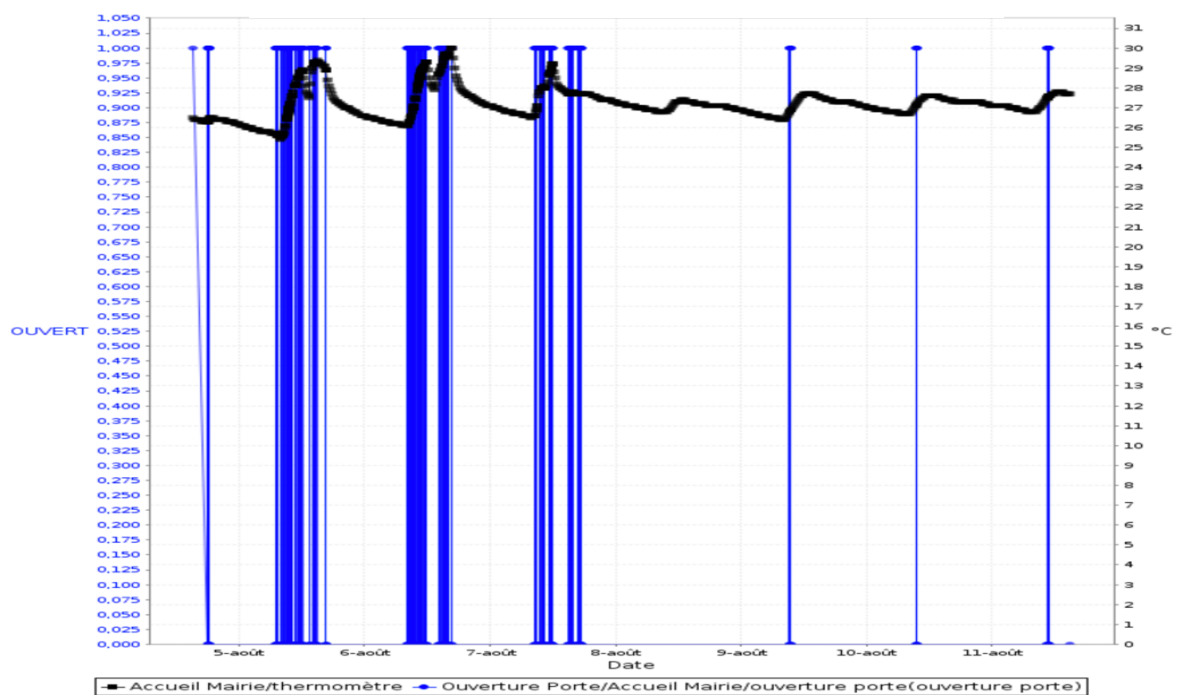


Figure 60 : Ouverture de portes en fonction de la température

<sup>4</sup> La thèse débutée en 2016 est suspendue actuellement pour des raisons de santé du doctorant

Ces cas nous ont amené à réfléchir à la conception des documents d'autorisations de collecte de données anonymisées (collecte de compteurs numériques) ainsi qu'à la mise en œuvre d'un processus de détection de données sensibles en amont du déploiement d'un RCSF.

### 3.3 Conclusion

Les différents travaux menés dans le cadre de ce programme scientifique nous permettent de mettre en œuvre notre expérience relative aux RCSF et de basculer dans la conception de systèmes intelligents, en intégrant une approche nouvelle de gestion des données pour la prévision et l'aide à la décision. Le développement d'un modèle selon le formalisme DEVS de prédiction, intégré à un système d'informations fournit des valeurs décisionnelles pour accompagner à la gestion des ressources et de services d'un petit village dans une logique de ville intelligente. Ces travaux nous permettent de mettre en œuvre la conception d'un système d'information pervasif, capable de prendre en compte son environnement et d'interagir avec lui, tout en essayant d'intégrer un contexte réglementaire de protection des données. Ces travaux soulèvent de nombreuses problématiques et hypothèses qui représentent de nouveaux défis scientifiques.

## 4 Perspectives de recherche

Les travaux présentés dans ce mémoire visent à comprendre le cheminement qui m'a conduit à caractériser les performances de réseaux de capteurs sans fil, suite à plusieurs participations à des programmes de recherche, dans diverses situations et soulevant différentes problématiques. Cette activité de recherche a permis d'intégrer ces dispositifs dans un système dit intelligent et de révéler la collecte et l'utilisation de données comme un élément central dans notre réflexion en profilant, selon 4 grands axes, notre recherche :

- une collecte de données pertinente et précise par le biais de différents dispositifs intégrés, embarqués avec l'avènement de **l'Internet des objets (IoT)** et les possibilités de communication sans fil améliorées ;
- la possibilité d'utiliser des données pour faire de la prédiction et de la prévision en utilisant la popularisation des outils d'**apprentissage** automatisé, par renforcement et profond.
- la **visualisation des données contextualisées** prenant en compte l'environnement et l'interaction avec les utilisateurs ;
- la multiplication des **systèmes d'information** par l'intégration du contexte, de tous types de processus et dispositifs.

Ce contexte, les différentes avancées technologiques et scientifiques, ces quatre axes nous amènent à la refonte, ou à la mise à jour de la définition de l'Intelligence Ambiante selon [39] comme proposée dans la Figure 61, en remplaçant les termes initiaux en bleu par ceux en vert.

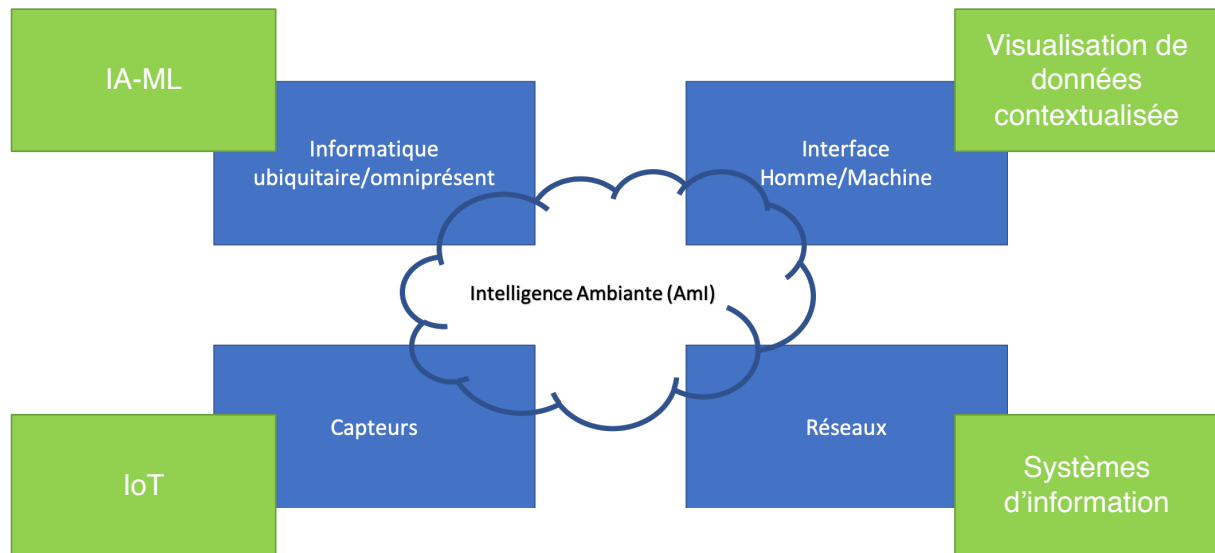


Figure 61 : Proposition d'une nouvelle définition de l'Intelligence Ambiante[39] selon les avancées scientifiques

#### 4.1 Développement des systèmes embarqués intelligents

Notre réflexion nous incite à poser notre regard vers les collecteurs de données. En effet, les avancées de ces dernières années dans la miniaturisation des objets connectés, l'augmentation des puissances de calcul nous invitent à délocaliser une partie de l'intelligence déployée dans le SIP au sein des objets connectés. Les problèmes de performance, de l'explosion des temps de calcul nous imposent de trouver des solutions pour alléger les algorithmes à intégrer. L'une des pistes envisagées est de proposer le développement d'une version allégée des algorithmes du MC Smart Entity, embarquée dans les dispositifs déployés dont l'objectif serait de transmettre des données prédites mais également de pouvoir interagir directement avec l'environnement.

Les hypothèses qui émergent :

1. la proposition d'un algorithme simplifié embarqué peut rendre la prédiction moins précise – cela doit favoriser l'émergence d'une intelligence embarquée peu gourmande en ressources du capteur sans fil.
2. le temps de calcul peut provoquer une surconsommation de la batterie. Mais est-elle supérieure à la transmission de la donnée ? Vaut-il mieux transmettre des données pour un calcul dans le cloud ou bien proposer une prédiction embarquée ? Comment favoriser une consommation raisonnée de la donnée de prédiction embarquée ?

3. la technologies LoRa ne propose pas de protocoles de routage de l'information, car l'organisation du réseau est principalement en étoile. Il semble intéressant de pouvoir développer un protocole de routage pour favoriser le transport de l'informations de proche en proche. Étant donné les nouvelles capacités dans la portée de signal, une telle avancée nous permettrait de disposer de maillages immenses sans quasiment aucune limite dans les distances. Cela permettrait aussi de rendre le RCSF utilisant LoRa plus résilient face à des phénomènes destructeurs ou des défaillances techniques.

#### 4.2 Prédiction de comportement d'êtres vivants

Notre modèle DEVS Smart Entity propose un certain nombre d'éléments qu'il est nécessaire de consolider. Il aborde de manière très simplifiée l'apprentissage automatique en basant ses prédictions sur les algorithmes les plus populaires dans la thématique des séries temporelles. En effet, nous savons que de tels apprentissages nécessitent des bases de données très importantes pour approcher de prédictions précises. Le peu de données disponibles peut être un frein dans la qualité de l'observation d'un système, mais surtout sur dans la prédiction de l'évolution de ce dernier.

Dans le cadre de dégradation de la biodiversité et du climat, il est difficile de pouvoir constituer des bases de données d'observations sur le long terme, pour ensuite en déduire des comportements. Nous avons vu, dans nos travaux précédents, que des dispositifs de géolocalisation d'espèces vivantes peuvent amener un certain nombre d'informations pour en déduire des tendances dans le comportement des animaux par le biais de post-traitement des données ou par du suivi en temps réel pour mieux les comprendre et les préserver. Ces informations sont peu nombreuses pour de l'apprentissage automatisé, mais cela ne doit pas être un frein à l'observation. Dans le cadre de la thèse de Monsieur François-Marie Manicacci, nous travaillons à la capacité à reproduire des comportements d'espèces par le biais de dispositifs déployés renvoyant des informations de suivi en temps réel. Cependant, il semble nécessaire de basculer vers des algorithmes d'apprentissage par renforcement, plus adapté à une prédiction évolutive dans un contexte de peu de données disponibles au début de l'apprentissage. De nombreuses problématiques émergent : quelle sera la précision des données produites ? Quelle est la quantité nécessaire de données pour réaliser des débuts de prédictions acceptables ? A quel moment pourrions-nous estimer que les données produites sont exploitables ? Comment réajuster son modèle prédictif avec des dispositifs déployés renvoyant des données en temps réel ?

#### 4.3 Vers un nouvel outil scientifique de suivi et de préservation de l'environnement

L'ensemble de ces réflexions doit nous amener à développer des instruments scientifiques rapidement déployables et peu coûteux en ressources pour nous aider à observer et à interagir avec un système. Notre capacité à développer de tels outils sera une plus-value pour la recherche dans de nombreux domaines et dans notre capacité à produire des solutions de préservation de l'environnement et de ses habitants. Les propositions autour d'une intelligence ambiante au service unique de la préservation des ressources sera l'une des clefs pour maintenir un espace habitable pour l'homme sur cette planète.

---

## Bibliographie

---

- [1] “Nature’s Dangerous Decline ‘Unprecedented’ Species Extinction Rates ‘Accelerating,’” Intergovernmental Science-Policy Platform on Biodiversity and Ecosystem Services (IPBES), May 2019.
- [2] J. F. Artiola, I. L. Pepper, and M. L. Brusseau, “MONITORING AND CHARACTERIZATION OF THE ENVIRONMENT,” *Environ. Monit. Charact.*, pp. 1–9, 2004.
- [3] K. Wise and N. Najafi, “The coming opportunities in microsensor systems,” *Solid-State Sensors and Actuators. Digest of Technical Papers, TRANSDUCERS*, 1991.
- [4] B. Warneke, M. Last, B. Liebowitz, and K. S. J. Pister, “Smart dust : Communicating with a cubic-millimeter computer.,” pp. 44–51, 2001.
- [5] J. Hill, R. Szewczyk, A. Woo, S. Hollar, D. Culler, and K. S. J. Pister, “System architecture directions for networked sensors,” in *Proceedings of the ninth international conference on Architectural support for programming languages and operating systems*, Cambridge, Massachusetts, USA, 2000, pp. 93–104.
- [6] J. Blumenthal, M. Handy, F. Golatowski, M. Haase, and D. Timmermann, “Wireless sensor networks - new challenges in software engineering,” in *Proceedings of IEEE Conference on Emerging Technologies and Factory Automation*, 2003, pp. 551–556.
- [7] C. G. Cassandras and S. Lafortune, *Introduction to Discrete Event Systems*. Springer Science & Business Media., 2008.
- [8] J. Popper, *La Dynamique des Systèmes, Principes et Applications*. Les Editions d’Organisation, 1973.
- [9] F. Bernardi, “Conception de bibliothèques hiérarchisées de modèles réutilisables selon une approche orientée objet,” Università di Corsica, Corte, 2002.
- [10] P. A. Fishwick, *Simulation Model design and execution ; Building digital worlds*. Prentice-Hall editions, 1995.
- [11] E. Ramat, “Contributions à la modélisation et à la simulation des systèmes complexes,” Habilitation à diriger des recherches, 2003.
- [12] T. Antoine-Santoni, J.-F. Santucci, E. De Gentili, and B. Costa, “Discrete Event Modeling and Simulation of Wireless Sensor Network Performance,” *SIMULATION*, vol. 84, no. 2–3, pp. 103–121,

Feb. 2008.

[13] T. Antoine-Santoni, J.-F. Santucci, E. de Gentili, and B. Costa, "Using Wireless Sensor Network for Wildfire detection. A discrete event approach of environmental monitoring tool," in *2006 First International Symposium on Environment Identities and Mediterranean Area*, Corte-Ajaccio, France, 2006, pp. 115–120.

[14] T. Antoine-Santoni, J.-F. Santucci, E. De Gentili, and B. Costa, "Modelling & Simulation oriented components of Wireless Sensor Network using DEVS formalism," in *The proceedings of spring simulation multiconference 2007*, Norfolk, Virginia, 2007, pp. 299–306.

[15] T. Antoine-Santoni, J.-F. Santucci, E. De Gentili, and B. Costa, "Discrete event simulation of a routing protocol in Wireless Sensor Network.," in *The 2007 International Conference on Modeling, Simulation and Visualization Methods*, Las Vegas, Nevada, USA, 2007, pp. 94–100.

[16] T. Antoine-Santoni, J.-F. Santucci, E. De Gentili, and B. Costa, "Simulation and visualization method of Wireless Sensor Network performances," in *IEEE-SCS International Symposium on Performance Evaluation of Computer and Telecommunication Systems*, San Diego, USA, 2007, pp. 476–483.

[17] T. Antoine-Santoni, J.-F. Santucci, E. De Gentili, and B. Costa, "DEVS-WSN : A discrete event approach for Wireless Sensor Network simulation," in *2008 IEEE/ACS International Conference on Computer Systems and Applications*, Doha, Qatar, 2008, pp. 895–898.

[18] T. Antoine-Santoni, J.-F. Santucci, E. De Gentili, and B. Costa, "Wildfire impact on deterministic deployment of a Wireless Sensor Network by a discrete event simulation," in *MELECON 2008 - The 14th IEEE Mediterranean Electrotechnical Conference*, Ajaccio, France, 2008, pp. 204–209.

[19] B. Poggi and T. Antoine-Santoni, "Wireless Sensor Network deployment using DEVS formalism and GIS representation," in *International Symposium on Performance Evaluation of Computer & Telecommunication Systems (SPECTS)*, Genoa, Italy, 2012, pp. 1–6.

[20] B. Poggi, J.-F. Santucci, and T. Antoine-Santoni, "Wireless sensor deployment decision support using genetics algorithm and devs formalism," in *Proceedings of the European Modeling and Simulation Symposium, 2013*, Athens, Greece, 2013, pp. 298–306.

[21] T. Antoine-Santoni, J.-F. Santucci, E. De Gentili, X. Silvani, and F. Morandini, "Performance of a Protected Wireless Sensor Network in a Fire. Analysis of Fire Spread and Data Transmission," *Sensors*, vol. 9, no. 8, pp. 5878–5893, Jul. 2009.



- [22] X. Silvani, F. Morandini, T. Antoine-Santoni, E. Innocenti, and A. Pieri, “Détection et monitoring d’incendie par réseau de capteur sans fil. Application à la surveillance d’un environnement industriel de stockage de combustible liquide, rapport final d’activité,” UMR CNRS SPE 6134, Corte, Rapport final d’activité SATT Sud Est, Jan. 2013.
- [23] X. Silvani and T. Antoine-Santoni, “Conditions de certification du réseau de capteur sans fil Crossbow pour fonctionnement en Atmosphère Explosive (ATEX : Directive 1994 / 9 / CE),” UMR CNRS SPE 6134, Jan. 2010.
- [24] X. Silvani, F. Morandini, E. Innocenti, and Peres, Sylvestre, “Evaluation of a Wireless Sensor Network with Low Cost and Low Energy Consumption for Fire Detection and Monitoring,” *Fire Technology*, pp. 971–993, 2015.
- [25] T. Antoine-Santoni, B. Poggi, E. De Gentili, and J.-F. Santucci, “Monitoring corsican dams using Wireless Sensor Network . Using WSN technologies for decision support,” in *IEEE Sixth International Conference on Wireless and Mobile Communications*, 2010.
- [26] P. Zhang, C. M. Sadler, S. A. Lyon, and M. Martonosi, “Hardware design experiences in ZebraNet,” in *Proceedings of the 2nd international conference on Embedded networked sensor systems - SenSys '04*, Baltimore, MD, USA, 2004, p. 227.
- [27] V. R. Jain, R. Bagree, A. Kumar, and P. Ranjan, “wildCENSE: GPS based animal tracking system,” in *2008 International Conference on Intelligent Sensors, Sensor Networks and Information Processing*, Sydney, Australia, 2008, pp. 617–622.
- [28] R. Zviedris, A. Elsts, G. Strazdins, A. Mednis, and L. Selavo, “LynxNet: Wild Animal Monitoring Using Sensor Networks,” in *Real-World Wireless Sensor Networks*, vol. 6511, P. J. Marron, T. Voigt, P. Corke, and L. Mottola, Eds. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg, 2010, pp. 170–173.
- [29] R. Kays, M. C. Crofoot, W. Jetz, and M. Wikelski, “Terrestrial animal tracking as an eye on life and planet,” *Science*, vol. 348, no. 6240, pp. 2478–2478, Jun. 2015.
- [30] J.-S. Gualtieri, A. Aiello, T. Antoine-Santoni, B. Poggi, and E. DeGentili, “Active Tracking of Maja Squinado in the Mediterranean Sea with Wireless Acoustic Sensors: Method, Results and Perspectives,” *Sensors*, vol. 13, no. 11, pp. 15682–15691, Nov. 2013.
- [31] D. B. Kilfoyle and A. B. Baggeroer, “The state of the art in underwater acoustic telemetry,” *IEEE J. Ocean. Eng.*, vol. 25, no. 1, pp. 4–27, Jan. 2000.

- [32] M. Jouhari, K. Ibrahim, H. Tembine, and J. Ben-Othman, "Underwater Wireless Sensor Networks: A Survey on Enabling Technologies, Localization Protocols, and Internet of Underwater Things," *IEEE Access*, vol. 7, pp. 96879–96899, 2019.
- [33] J.-S. Gualtieri *et al.*, "Localization method according to collected data from an acoustic wireless sensor network," in *Localization method according to collected data from an acoustic wireless sensor network*, Colmar, France, 2015, pp. 33–41.
- [34] A. Savitzky and M. J. E. Golay, "Smoothing and Differentiation of Data by Simplified Least Squares Procedures," *Analytical chemistry*, pp. 1627–1639, 01-Jul-1964.
- [35] Lora Alliance, "White Paper: A Technical Overview of Lora and LoRaWAN," CA, USA, 2015.
- [36] T. Antoine-Santoni, J.-S. Gualtieri, F.-M. Manicacci, and A. Aiello, "AMBLoRa: a Wireless Tracking and Sensor System Using Long Range Communication to Monitor Animal Behavior," 35-40, 2018, pp. 35–40.
- [37] T. Antoine-Santoni and A. Paolini, "Rapport d'activités programme Smart Village-Smart Paesi - 2018," UMR CNRS SPE 6134, Corte, Dec. 2018.
- [38] M. Weiser, "The Computer for the 21st Century," *ACM SIGMOBILE*, vol. 3, no. 3, pp. 3–11, 1999.
- [39] J. Augusto Wrede, *Ambient Intelligence: The Confluence of Ubiquitous/Pervasive Computing and Artificial Intelligence*. 2007.
- [40] J. Coutaz and J. L. Crowley, "Plan « intelligence ambiante » : défis et opportunités," Oct. 2008.
- [41] N. Salma, "Adaptation des services sensibles au contexte selon une approche intentionnelle," p. 317.
- [42] A. D'Auria, C. C. Amitrano, F. Bifulco, and M. Tregua, "ICT and sustainability in smart cities management," *Int. J. Public Sect. Manag.*, vol. 29, no. 2, pp. 132–147, Feb. 2016.
- [43] European Parliament, "Mapping Smart Cities in EU 2014," Technical report, 2014.
- [44] I. Zubizarreta, A. Seravalli, and S. Arrizabalaga, "Smart City Concept: What It Is and What It Should Be," *J. Urban Plan. Dev.*, vol. 142, no. 1, May 2015.
- [45] R. Kitchin, "The real-time city? Big data and smart urbanism," *GeoJournal*, vol. 79, no. 1, pp. 1–14, Feb. 2014.

- [46] A. Greenfield, *Everyware: The dawning age of ubiquitous computing*, 1st ed. New Riders Publishing, 2006.
- [47] K. Kourtit, P. Nijkamp, and D. Arribas, “Smart cities in perspective – a comparative European study by means of self-organizing maps,” *Innov. Eur. J. Soc. Sci. Res.*, vol. 25, no. 2, pp. 229–246, Jun. 2012.
- [48] Caisse des dépôts, “Étude de la caisse des dépôts Smart city versus stupid village ?,” Etude, 2016.
- [49] Antoine-Santoni, Thierry, “Emergence de territoires intelligents,” in *L’ingénierie verte*, CNRS Edition., CNRS, 2019.
- [50] T. Antoine-Santoni, B. Poggi, E. Vittori, F.-M. Manicacci, J.-S. Gualtieri, and A. Aiello, “Proposition of a smart environment architecture for resources monitoring and rural activities management,” in *Proceedings of SENSORCOMM 2019*, Nice, France, 2019.
- [51] T. Antoine-Santoni, B. Poggi, E. Vittori, D. Araujo, H. Van Hieu, and A. Aiello, “Vers un système d’information pervasif pour un Smart Village,” in *Vers des SI pervasifs*, Paris, 2019.
- [52] T. Antoine-Santoni, B. Poggi, E. Vittori, H. V. Hieux, M. Delhom, and A. Aiello, “Smart Entity – How to build DEVS models from large amount of data and small amount of knowledge ?,” in *Proceedings of 11th EAI International Conference on Simulation Tools and Techniques*, Chengdu, People’s Republic of China, 2019.
- [53] T. Antoine-Santoni, B. Poggi, E. Vittori, H. Van Hieu, M. Delhom, and A. Aiello, “‘Smart Entity’ – How to build DEVS models from large amount of data and small amount of knowledge ?,” in *Simulation, Tools and Techniques 2018*, Chengdu, China, 2018.

---

# Tables des illustrations

---

FIGURE 1 : LES ESCALIERS DE LA CONNAISSANCE [2].....	27
FIGURE 2 : ACQUISITION DE DONNEES ET ACTIONS [1].....	29
FIGURE 3 : COMPOSANT D'UN CAPTEUR SANS FIL SELON [6] .....	31
FIGURE 4 : LES TECHNOLOGIES DES RCSF OU IDO EN 2018 (KEYSIGHT TECHNOLOGIES) .....	33
FIGURE 5 : INTERACTION SYSTEME - MODELE - SIMULATEUR .....	34
FIGURE 6 : CHOIX DU FORMALISME EN FONCTION DE L'ETAT, DU TEMPS, DE L'ESPACE SELON [11] .....	35
FIGURE 7 : MODELE ATOMIQUE DEVS.....	36
FIGURE 8 : MODELE COUPLE DEVS (AVEC 2 MA ET 1 MC).....	37
FIGURE 9 : PHASE DE SIMULATION ET PHASE DE MODELISATION ET CONCORDANCE .....	39
FIGURE 10 : MODELE COUPLE SENSOR DE REPRESENTATION D'UN NŒUD DE RCSF .....	40
FIGURE 11 : TYPES DE RESULTATS PROPOSES PAR DEVS-WSN.....	42
FIGURE 12 : CLASSIFICATION DES RESULTATS DE SIMULATION D'UN DEPLOIEMENT DETERMINISTE DANS LE CADRE DE SCENARION DE FEU .....	44
FIGURE 13 : LES ETAPES D'EXECUTION D'UNE METAHEURISTIQUE .....	46
FIGURE 14 : ARCHITECTURE DEVS DU PROCESSUS D'OPTIMISATION PROPOSEE PAR B. POGGI .....	47
FIGURE 15 : MODELE ATOMIQUE DEVS DE COUVERTURE D'UN RESEAU DE CAPTEURS SANS FIL.....	49
FIGURE 16 : SOUS-ZONES A) ET ATTENUATION DU SIGNA LB).....	49
FIGURE 17 : MA DEVS CONNECTIVITE .....	50
FIGURE 18 : EXEMPLE D'OPTIMISATION DE DEPLOIEMENT EN ZONE AVEC ATTENUATION DE SIGNAL (1) .....	52
FIGURE 19 : EXEMPLE D'OPTIMISATION DE DEPLOIEMENT EN ZONE AVEC ATTENUATION DE SIGNAL (2) .....	52
FIGURE 20 : EXEMPLE D'OPTIMISATION DE DEPLOIEMENT EN ZONE AVEC ATTENUATION DE SIGNAL (3) .....	53
FIGURE 21 : EXPERIENCES DE FEU A PLAT ET SUR PENTES EN LABORATOIRE A CORTE AU PLATEAU VIGNERES INRA AVIGNON ET FEU REEL .....	54
FIGURE 22 : CAPTEURS MICAZ DE LA SOCIETE MEMSIC / CAPTEURS AVEC PROTECTION THERMIQUE ZETEX ET LAINE CERAMIQUE ...	55
FIGURE 23 : CABLAGE D'UN CAPTEUR DE TEMPERATURE (FIL VERT) SUR LE DUO MICAZ .....	56
FIGURE 24 : SCHEMAS EXPERIMENTAUX EN FEU REEL AVEC MICAZ ET MDA300 (3 , 8ET 12 NŒUDS) .....	58
FIGURE 25 : SCHEMA EXPERIMENTAL POUR DES TESTS FILAIRES – SANS FIL AVEC THERMOCOUPLES K.....	58
FIGURE 26 : CARACTERISATION DES PERFORMANCES DES RESEAUX DE CAPTEURS SANS FIL DANS UN FEU REEL .....	59
FIGURE 27 : COMPARAISON ENTRE LE SIGNAL SINUSOÏDAL ENREGISTRE SUR LA CENTRALE FILAIRE ET LE RESEAU SANS FIL A 5 NŒUDS 0.01 (HAUT) - 0.5 (MILIEU) - 0.1 (BAS)HZ .....	61
FIGURE 28 : RETARD MESURE SUR LE SIGNAL SINUSOÏDAL POUR CHAQUE NŒUD POUR LES FREQUENCES 0.01 - 0.5 - 0.1 Hz .....	62
FIGURE 29 : SIGNAL EN CRENEAU POUR LA FREQUENCE 0.01 (HAUT)- 0.5 (CENTRE) -0.1 Hz (BAS).....	63
FIGURE 30 : RETARD MESURE SUR LE SIGNAL EN CRENEAU POUR CHAQUE NŒUD POUR LES FREQUENCES 0.01 - 0.5 - 0.1 Hz .....	64
FIGURE 31 : SCHEMA DE DEPLOIEMENT D'UN RESEAU DE SURVEILLANCE SANS FIL DANS UNE ZONE ATEX 2 AUTOUR DE CUVES FO2 ET FOD .....	65
FIGURE 32 : SITE EXPERIMENTAL MONTAGNEUX DE L'OSO (CORSE DU SUD) .....	66

FIGURE 33 : POINT DE MESURE DE NIVEAU ET DE QUALITE DE L'EAU DANS BASSIN .....	67
FIGURE 34 : UNE ARAIGNEE DE MER EQUIPEE D'UN DISPOSITIF DE GEOLOCALISATION VEMCO.....	69
FIGURE 35 : FORCE DU SIGNAL DE DIFFERENTS MATERIELS EN FONCTION DE LA PROFONDEUR ET LA DISTANCE D'UN RECEPTEUR PASSIF POUR LES BALISES DE TRAÇAGES V9 (A) ET B)) ET V13 (c) ET D)).....	70
FIGURE 36 : DIFFRACTION DES ONDES ET PERTURBATION DU SIGNAL SELON [32] .....	70
FIGURE 37 : SIGNAUX COLLECTES DURANT UNE CAMPAGNE EXPERIMENTALE DANS LE CADRE DU SUIVI D'UNE ARAIGNEE DE MER .....	71
FIGURE 38 : HOMMARUS GAMMARUS EQUIPE DE BALISE V13 ET UNE BALISE DE RECEPTION ACOUSTIQUE PASSIVE VR2W.....	71
FIGURE 39 : DEFINITION DE LA ZONE EXPERIMENTALE DE TRAQUE PASSIVE.....	72
FIGURE 40 : SIGNAL BRUITE EMIS PAR LE HOMARD AVEC LA BALISE 8798 ET SA COURBE L10 LISSEE SELON LA METHODE DE SMOOTHING DE SAVISKY-GOLAY .....	72
FIGURE 41 : RECONSTITUTION DES POSITIONS DE TROIS HOMARDS EQUIPES DE BALISES VEMCO EN TRAQUE PASSIVE .....	73
FIGURE 42 : ARCHITECTURE D'UN RESEAU LoRa/LoRa WAN .....	75
FIGURE 43 : SCHEMA DE COMPOSANTS DE AMBLORA.....	76
FIGURE 44 : (A)CERF EQUIPE DU DISPOSITIF AMBLORA (B) PASSERELLE KERLINK LoRa .....	76
FIGURE 45 : RESULTATS DE GEOLOCALISATION DE AMBLORA SUR LE SUIVI DU CERF .....	77
FIGURE 46 : TEMPS DE SOLlicitATION DU MODULE LoRa DURANT LES PHASES DE COMMUNICATION DES 3 ALGORITHMES SELON DIFFERENTS PARCOURS.....	79
FIGURE 47 : TEMPS D'EXECUTION D'UN ALGORITHME EN FONCTION DES DIFFERENTS PARCOURS .....	80
FIGURE 48 : CONSOMMATION ENERGETIQUE SELON LES 3 ALGORITHMES COMPAREE .....	80
FIGURE 49 : TESTS EN PARCOURS MONTAGNEUX A) VUE SATELLITE DU PARCOURS, B) VUE EN PLAN DU PARCOURS, C) RESULTATS REPORTES DES POSITIONS PYCOM .....	81
FIGURE 50 : COLLIER EN SILICONE AVEC LOPY4 - PYTRACK.....	82
FIGURE 51 : REPRESENTATION DU CONCEPT D'INTELLIGENCE AMBIANTE PAR A. WREDE[39] .....	83
FIGURE 52 : SCHEMA SIMPLIFIE DE L'ARCHITECTURE .....	88
FIGURE 53 : MODELE COUPLE DEVS SMART SYSTEM POUR LA PREDICTION ET L'OPTIMISATION PAR LA SIMULATION.....	91
FIGURE 54 : PERFORMANCES D'ALGORITHMES SELON UN SCORE AFFECTE AU MSE .....	93
FIGURE 55 : RECHERCHE DE VALEURS OPTIMISEES ENTRE DES DONNEES OBSERVEES (E), PREDITES (R) ET DECISIONNELLES (D).....	93
FIGURE 56 : METHODE DE PREDICTION EN APPUI SUR UNE BASE DE DONNEES EXISTANTES (APPROCHE 1).....	94
FIGURE 57 : METHODE PAR RECONSTRUCTION DE LA SERIE DE DONNEES QUOTIDIENNES (APPROCHE 2).....	94
FIGURE 58 : TESTS DE PREDICTION DE TEMPERATURE SUR DE LONGUES PERIODES (JOURS) SELON APPROCHE 1 ET APPROCHE 2 .....	95
FIGURE 59: TEST DE PERFORMANCES DE 10, 100 ET 1000 MODELES SMART ENTITY EN PARALLELE.....	96
FIGURE 60 : OUVERTURE DE PORTES EN FONCTION DE LA TEMPERATURE.....	97
FIGURE 61 : PROPOSITION D'UNE NOUVELLE DEFINITION DE L'INTELLIGENCE AMBIANTE[39] SELON LES AVANCEES SCIENTIFIQUES....	98

---

# Tableaux

---

TABLEAU 1 : REPARTITION DES ENSEIGNEMENTS POUR L'ANNEE 2018 -2019.....	13
TABLEAU 2 : EXEMPLES DE CAPTEUR .....	30
TABLEAU 3 : COMPARAISON DES SIMULATEURS DE RCSF .....	40
TABLEAU 4 : FONCTIONS INTEGREES AUX MA COUVERTURE ET MA CONNECTIVITE .....	51
TABLEAU 5 : PRESENTATION DES DIFFERENTS CAPTEURS UTILISES .....	90

---

## Publications de référence

---

- T. Antoine-Santoni, J.-F. Santucci, E. De Gentili, and B. Costa, “Discrete Event Modeling and Simulation of Wireless Sensor Network Performance,” *SIMULATION*, vol. 84, no. 2–3, pp. 103–121, Feb. 2008.
- T. Antoine-Santoni, J.-F. Santucci, E. De Gentili, X. Silvani, and F. Morandini, “Performance of a Protected Wireless Sensor Network in a Fire. Analysis of Fire Spread and Data Transmission,” *Sensors*, vol. 9, no. 8, pp. 5878–5893, Jul. 2009.
- J.-S. Gualtieri, A. Aiello, T. Antoine-Santoni, B. Poggi, and E. DeGentili, “Active Tracking of Maja Squinado in the Mediterranean Sea with Wireless Acoustic Sensors: Method, Results and Perspectives,” *Sensors*, vol. 13, no. 11, pp. 15682–15691, Nov. 2013.