



Contribution à la conception des systèmes électroniques intelligents pour l'industrie du futur

Mohamed Tabaa

► To cite this version:

Mohamed Tabaa. Contribution à la conception des systèmes électroniques intelligents pour l'industrie du futur. Electronique. Université de Lorraine, 2020. tel-02978734

HAL Id: tel-02978734

<https://hal.univ-lorraine.fr/tel-02978734>

Submitted on 26 Oct 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.

Contribution à la conception des systèmes électroniques intelligents pour l'industrie du futur

Habilitation à Diriger des Recherches

Présentée et soutenue le 25 septembre 2020

Par

Mohamed TABAA

Rapporteurs : Prof. Mohamad SAWAN, Université Westlake, Chine

Prof. Lirida NAVINER, Telecom Paris, France

Prof. Patrick GIRARD, Université Montpellier, France

Examineurs : Prof. Ian O'CONNOR, Ecole Centrale de Lyon, France

Prof. Fabrice MONTEIRO, Université de Lorraine, France

Prof. Abbas DANDACHE, Université de Lorraine, France

A mes parents

A ma femme chérie

A ma sœur

Remerciement

Je commence tout d'abord par remercier mon parrain Monsieur Abbas Dandache qui a cru en moi et en mes capacités et qui a été d'un grand soutien pour moi. Je ne le remercierai jamais assez pour sa disponibilité, ses conseils et recommandations et surtout pour ses grandes qualités humaines. Quoi que je dise, je ne pourrai exprimer assez ma reconnaissance envers vous « Mille mercis Abbas ».

Un énorme merci à Monsieur Fabrice Monteiro professeur à l'Université de Lorraine. Merci de m'avoir donné l'opportunité de collaborer et de travailler ensemble, et de m'avoir fait confiance. Merci aussi pour tous les conseils pertinents, les recommandations et surtout nos longs échanges.

Je tiens à exprimer ma gratitude aux membres de jurys, qui m'ont fait honneur en acceptant d'évaluer mon travail de thèse. Merci à Monsieur Mohamad Sawan professeur à l'Université Westlake en Chine, à Madame Lirida Naviner professeur au Telecom Paris, et Monsieur Patrick Girard professeur à l'Université de Montpellier d'avoir accepté d'être les rapporteurs de mon Habilitation à diriger des recherches. Merci à Monsieur Ian O'connor professeur à l'école centrale de Lyon, à Monsieur Abbas Dandache et à Monsieur Fabrice Monteiro d'avoir accepté d'examiner ce travail de recherche.

Je tiens à remercier le directeur général de l'EMSI Groupe, membre du groupe Honoris United Universities, Monsieur Karim Alami pour sa participation au développement de la recherche au Maroc.

Mes remerciements vont à tous mes collègues de LPRI à Casablanca qui ont contribué au rayonnement de l'EMSI à travers la recherche et l'innovation. Je vous adresse un grand merci pour les moments sympathiques et le cadre agréable que nous avons partagé ensemble au sein du LPRI. Je tiens à remercier aussi toutes les personnes avec qui j'ai eu le plaisir de faire connaissance au sein du laboratoire LGIPM à Metz.

Un grand remerciement envers mes chers parents qui m'ont soutenu durant les périodes les plus difficiles de ma vie. Je vous suis très reconnaissant. Je remercie ma femme chérie pour sa patience, son amour, et ses encouragements. Merci d'avoir été la seule source d'inspiration et de motivation pour compléter ce travail. Enorme merci à ma petite sœur pour sa disponibilité et son amour inconditionnel.

Table des matières

Remerciement	3
Table des figures	8
Table des tableaux	11
Fiche Personnelle	12
I. Fiche individuelle.....	13
II. Bilan des activités de recherches.....	14
1. Bilan avant soutenance de thèse	14
2. Bilan après soutenance de thèse	15
3. Résumé des activités de recherche à l’EMSI	17
4. Projets de recherche menés / en cours	18
III. Projet scientifique	22
IV. Encadrement.....	25
V. Activités d’enseignement.....	28
VI. Publications.....	29
Introduction générale	37
Partie 1 L’industrie du futur.....	41
I. Introduction.....	42
II. Industrie 4.0 et 5.0.....	42
III. Society 5.0.....	44
IV. Made in Chine 2025	45
V. Avancées technologiques à l’ère de l’industrie du futur.....	46
1. Internet industriel des objets	46
2. Intelligence artificielle	47
3. Cobots.....	48
4. Outils de simulations avancés	48
5. Disponibilité de l’énergie : énergie propre.....	49
6. Optimisation de la chaine logistique.....	49
VI. Conclusion	50
Partie 2 Système de communication industriel sans-fil	51
Chapitre 2.1 : Conception architecturale.....	52

I.	Introduction.....	52
II.	Système de communication industriel.....	53
III.	La théorie de la transformée en ondelette	54
IV.	Système architecturale à base de DWPT	56
1.	Architecture à base de DWPT	56
2.	Fonctionnement.....	56
I.	Caractéristiques du canal industriel.....	58
1.	Fadings.....	59
2.	Bruit.....	60
II.	Discussions et résultats.....	61
1.	Simulations sous canal AWGN et industriel.....	61
2.	Performances : Code correcteur d'erreurs.....	63
3.	Performances : DWPT vs OFDM.....	66
III.	Conclusion	69
Chapitres 2.2 Conception matérielle		70
I.	Introduction.....	70
II.	Les architectures linéaires et non parallèles.....	72
1.	Architecture linéaire de pipeline DWPT : première génération	72
2.	Architecture linéaire de pipeline IDWPT : première génération.....	74
3.	Résultats de la synthèse	76
III.	Architectures DWPT /IDWPT p-parallèle et pipelines proposés	77
1.	Architecture de pipeline P-Parallèle DWPT : première génération de DWPT	78
2.	Architecture de pipeline p-parallèle IDWPT : première génération.....	80
3.	Résultats de la synthèse	81
IV.	Architecture de pipeline-parallèle pour DWPT/IDWPT.....	83
V.	Architecture lifting-scheme en pipeline avec partage des ressources.....	84
VI.	Conclusion	86
Partie 3 Traitement intelligent de données		87
Chapitres 3.1 Diagnostic automatisé		88
I.	Introduction.....	88
II.	Démarche et outils.....	89
1.	Modèle proposé.....	90
2.	Extraction des données	90
3.	Les outils de classification	92
4.	Les mesures de performances	94
III.	Discussions	95

1. Collecte des données	95
2. Traitement des données	96
3. Resultats.....	99
IV. Conclusion	102
Chapitre 3.2 Prévision des systèmes photovoltaïque	104
I. Introduction.....	104
II. Stratégie et démarche	105
III. Les techniques d'apprentissage statistique.....	107
1. LSSVR.....	107
2. FFNN	108
IV. Plateforme et démarche	110
1. Plateforme.....	110
2. Les mesures statistiques.....	111
3. Développement de modèles	112
V. Analyse des résultats	113
1. Auto-régression non linéaire avec des entrées exogènes modèles (NARX)	113
2. Modèles autorégressifs non linéaires (NAR)	116
3. Modèles de référence	117
VI. Conclusion	118
Partie 4 Management des énergies mixtes	120
Chapitre 4.1 Optimisation des énergies mixtes.....	121
I. Introduction.....	121
II. Architecture proposée.....	123
III. Modélisation.....	126
1. Installation photovoltaïque	127
2. �olienne : générateur synchrone à aimant permanent (PMSG)	128
3. Système de stockage de batteries.....	128
IV. Stratégie de gestion de l'énergie.....	129
1. Niveau de gestion des HRES.....	130
2. Niveau de programmation / décalage de la charge.....	131
3. Gestion au niveau des micro-réseaux.....	131
4. Gestion énergétique d'un HRES à l'intérieur d'un micro-réseau	132
V. Discussion.....	134
1. PV-Eolien-Batterie HRES en interaction avec son réseau de voisinage intelligent	134
2. Partager l'énergie et la communication Les HRES de l'ensemble du micro-réseau	136
VI. Conclusion	137

Chapitre 4.2	Autosuffisance énergétique du bâtiment passif	139
I.	Introduction	139
II.	Méthodologie	141
III.	Différents paramètres de construction	142
1.	Taux global des baies vitrées	142
2.	Inertie thermique	142
3.	Déphasage thermique	143
4.	Degré-jour unifié	143
5.	Bilan énergétique	144
IV.	Production et distribution d'énergie électrique	145
1.	Générateur photovoltaïque	145
2.	Générateur éolien	146
3.	Batterie	146
4.	Régulateur	147
5.	Convertisseurs statiques	147
6.	Simulation thermique dynamique et bilan instantané	148
V.	Environnement de simulations	150
1.	Description du bâtiment de référence	150
2.	Zonage thermique	151
3.	Composition de l'enveloppe du bâtiment	151
4.	Taux global des baies vitrées	152
5.	Gains de chaleur interne	153
6.	Conditions de conditionnement d'air	153
7.	Localisation et données météorologiques	154
8.	Isolation thermique	154
9.	Plateforme	155
10.	Composantes du système	155
VI.	Discussion et résultats	156
1.	Performance énergétique du bâtiment de référence	156
2.	Performance énergétique du bâtiment optimisé	157
3.	Taux d'autosuffisance énergétique	160
VII.	Conclusion	165
Conclusion et perspectives		166
Références		169

Table des figures

Figure1 Stratégie de l'équipe PRI à l'EMSI.....	23
Figure 2 Projet de recherche.....	25
Figure 3 Evolution de l'industrie.....	44
Figure 4 Modèle industriel japonais	45
Figure 5 Stratégie Made in Chine 2025	46
Figure 6 Pyramide de CIM.....	53
Figure 7 Emetteur à base IDWPT et récepteur à base de DWPT	56
Figure 8 Mode Many-to-One.....	57
Figure 9 Fonctionnement de l'émetteur en mode MtO	57
Figure 10 Mode One-to-Many.....	58
Figure 11 Receiver in One-to-Many mode.....	59
Figure 12 Fonctionnement des modes OtM et MtO dans CIM	59
Figure 13 Réponse impulsionnelle du canal simulé.....	59
Figure 14 Bruit industriel avec un facteur d'échelle $R=50$	60
Figure 15 Performances de quatre ondelettes.....	61
Figure 16 BER/SNR sur un canal à évanouissement avec bruit AWGN pour le mode MtO.....	62
Figure 17 BER/SNR sur un canal à évanouissement avec bruit industriel pour le mode MtO	62
Figure 18 BER/SNR sur un canal à évanouissement à 2,4 GHz avec bruit AWGN pour le mode OtM	63
Figure 19 BER/SNR sur un canal à évanouissement avec un bruit industriel pour le mode OtM	63
Figure 20 Architecture pour 16 8 capteurs avec le codage canal.....	64
Figure 21 BER/SNR sur un canal à évanouissement avec bruit AWGN pour le mode MtO.....	65
Figure 22 BER/SNR sur un canal à évanouissement avec bruit industriel pour le mode MtO	66
Figure 23 BER/SNR pour DWPT vs OFDM sur un canal AWGN	68
Figure 24 BER/SNR pour DWPT vs OFDM sur un canal industriel à évanouissement (16 capteurs) .	68
Figure 25 BER/SNR pour DWPT vs OFDM sur un canal industriel à évanouissement (32 capteurs) .	68
Figure 26 Arbre de décomposition DWPT à trois niveaux	72
Figure 27 Bloc du chemin de données de l'architecture DWPT	73
Figure 28 Architecture d'un seul filtre modifié FIR	73
Figure 29 Structure de bloc buffer à l'étape k	73
Figure 30 Bloc de contrôle	74
Figure 31 Trois niveau de l'arbre de synthèse des paquets d'ondelette	75
Figure 32 Bloc du chemin de données de l'architecture IDWPT	75
Figure 33 Architecture u filtre transposé modifié.....	76
Figure 34 Architecture DWPT P-Parallèle à trois niveaux	77
Figure 35 Architecture IDWPT P-Parallèle à trois niveaux	78
Figure 36 Architecture d'un seul filtre FIR modifié	79
Figure 37 schéma du cheminement des données de l'architecture p-parallèle DWPT	79
Figure 38 Structure du bloc Buffer K étape de l'architecture parallèle DWPT	80
Figure 39 Unité de contrôle.....	80
Figure 40 schéma du cheminement des données de l'architecture p-parallèle IDWPT	81
Figure 41 Structure bu bloc buffer dans l'étage k avec un degré parallélisme $P=4$	81
Figure 42 Proposition de chemin de données p-parallèle DWPT et IDWPT	84
Figure 43 Implémentation de l'architecture DWPT lifting-scheme [MAN09]	85

Figure 44 Schéma du cheminement des données lifting-scheme modifié de l'architecture DWPT	85
Figure 45 Structure des filtres P/U à l'étape k	86
Figure 46 Structure de buffer dans l'étage k	86
Figure 47 Forme du signal ECG.....	89
Figure 48 l'approche développé	90
Figure 49 Collecte des données ECG basant sur Sparkfun-AD8232.....	95
Figure 50 un échantillon du signal ARR bruyant enregistré	97
Figure 51 Forme du signal du rythme cardiaque normal	97
Figure 52 (a) Signal d'arythmie, (b) Signal d'insuffisance cardiaque congestive	98
Figure 53 Gamme de spectre de singularité par groupe.....	98
Figure 54 La probabilité cumulative des trois signaux ECG typiques.....	99
Figure 55 Modèles physique et statistique pour la prévision PV.....	106
Figure 56 Présentation d'un simple neurone	109
Figure 57 Architecture multicouche du réseau neuronal de perceptron.....	110
Figure 58 Plateforme PV EMSI Casablanca – Maroc -	110
Figure 59 L'approche utilisé dans l'apprentissage LSSVR	112
Figure 60 L'approche utilisée dans l'apprentissage FFNN.....	113
Figure 69 La répartition de cinq maisons dans l'espace 2D.....	124
Figure 70 La topologie d'interconnexion globale.....	125
Figure 71 Configuration proposée pour une batterie éolienne PV connectée au réseau en interaction avec son réseau de voisinage intelligent	126
Figure 72 Système de gestion de l'énergie PV-éolienne-Batterie (HRES) connectée au réseau, en interaction avec son micro-réseau.....	130
Figure 73 Système de gestion de l'énergie pour le niveau de programmation/décalage de la charge .	131
Figure 74 Système de gestion de l'énergie au niveau de micro-réseau.....	132
Figure 75 Diagramme d'automate à état fini de gestion d'énergie	133
Figure 76 La puissance de l'installation PV et éolienne	134
Figure 77 Demande d'électricité aléatoire pendant les jours typiques des saisons de l'année	134
Figure 78 Demande du réseau électrique des HRES pendant les jours typiques de saisons de l'année	135
Figure 79 Gestion de l'énergie sur une journée régulière de chaque saison de l'année pour une maison équipée d'un système hybride connecté au réseau	136
Figure 80 Demande de l'électricité pendant les jours typique de l'année pour cinq HRES.....	138
Figure 81 Partage de l'énergie de chaque HRES avec le consommateur d'énergie de son micro-réseau	138
Figure 82 Diagramme d'évaluation de la performance énergétique.....	141
Figure 83 Architecture proposée	142
Figure 84 Évolution des températures intérieures d'un bâtiment par rapport aux températures extérieures	143
Figure 85 Circuit électrique équivalent dans le modèle PV considéré	145
Figure 86 Orientations du bâtiment de référence.....	150
Figure 87 Vue axonométrique du bâtiment de référence	151
Figure 88 Zonage thermique au niveau du plan 2D du rez-de-chaussée.....	151
Figure 89 Zonage thermique au niveau du plan 2D du premier étage	151
Figure 90 L'architecture du PBRES dans l'environnement de TRNSYS	155
Figure 91 Comparaison des résultats de la simulation avec les valeurs de référence selon le RTCM.	157
Figure 92 Comparaison des performances énergétiques de différents isolants thermiques par rapport aux valeurs de référence conformément au RTCM pour Agadir.....	158
Figure 93 Comparaison des performances énergétiques de différents isolants thermiques par rapport aux valeurs de référence conformément au RTCM pour Tanger	158

Figure 94 Comparaison des performances énergétiques de différents isolants thermiques par rapport aux valeurs de référence conformément au RTCM pour Fès	159
Figure 95 Comparaison des performances énergétiques de différents isolants thermiques par rapport aux valeurs de référence conformément au RTCM pour Ifrane	159
Figure 96 Comparaison des performances énergétiques de différents isolants thermiques par rapport aux valeurs de référence conformément au RTCM pour Marrakech.....	159
Figure 97 Comparaison des performances énergétiques de différents isolants thermiques par rapport aux valeurs de référence conformément au RTCM pour Errachidia	160
Figure 98 Comparaison de l'évolution de l'autosuffisance énergétique entre le cas de base et le cas optimisé pour Agadir	161
Figure 99 Comparaison de l'évolution de l'autosuffisance énergétique entre le cas de base et le cas optimisé pour Tanger	161
Figure 100 Comparaison de l'évolution de l'autosuffisance énergétique entre le cas de base et le cas optimisé pour Fès.....	162
Figure 101 Comparaison de l'évolution de l'autosuffisance énergétique entre le cas de base et le cas optimisé pour Ifrane.....	162
Figure 102 Comparaison de l'évolution de l'autosuffisance énergétique entre le cas de base et le cas optimisé pour Marrakech	163
Figure 103 Comparaison de l'évolution de l'autosuffisance énergétique entre le cas de base et le cas optimisé pour Errachidia.....	163
Figure 104 Comparaison du taux d'autosuffisance énergétique entre le cas de base et le cas optimisé dans les villes étudiées	164

Table des tableaux

Tableau 1 Les paramètres du système.....	61
Tableau 2 Les paramètres du système avec codage	66
Tableau 3 Les paramètres de simulation	67
Tableau 4 Comparaison des BER pour un SNR=20dB.....	69
Tableau 5 Résultats d'implémentation des architectures pipeline DWPT et IDWPT	77
Tableau 6 Résultats d'implémentation des architectures 4-parallèle DWPT et IDWPT	82
Tableau 7 Résultats d'implémentation des architectures 16-parallèle DWPT et IDWPT	82
Tableau 8 Résultats d'implémentation des architectures 16-parallèle DWPT et IDWPT	83
Tableau 9 Résultats d'implémentation de l'architecture parallèle du filtre FIR.....	84
Tableau 10 Matrice de classifications.....	95
Tableau 11 Aperçu des études menés sur la classification automatisée des signaux ECG	101
Tableau 12 Résultats de la precision par classe.....	102
Tableau 13 Résultats de la classification sans activation de PCA	103
Tableau 14 Résultats de la classification avec activation de PCA.....	103
Tableau 15 Caractéristiques des panneaux solaires installés.....	111
Tableau 16 Caractéristiques de l'onduleur	111
Tableau 17 Les paramètres LSSVR-NARX.....	114
Tableau 18 Les résultats du modèle LSSVR-NARX.....	114
Tableau 19 Les résultats de dimmensionnement ANN pour les modèles NARX.....	115
Tableau 20 Les résultats du modèle FNN-NARX	115
Tableau 21 Les meilleurs paramètres LSSVR-NAR	116
Tableau 22 Les résultats du modèle LSSVR-NAR.....	117
Tableau 23 Les résultats de dimmensionnement ANN pour les modèles NAR	117
Tableau 24 Les résultats du modèle NAR.....	117
Tableau 25 MPR et persistant vs LSSVR et FFNN	118
Tableau 26 étude comparative des architectures d'hybridation énergétique	123
Tableau 27 Résumé des transistions du système	133
Tableau 28 Composition des murs et propriétés thermo-physiques	152
Tableau 29 Résumé du calcul du taux globales des baies vitrées.....	152
Tableau 30 Gains de chaleur interne.....	153
Tableau 31 Localisation et données météorologiques	154
Tableau 32 Catégories d'isolation et propriétés thermo-physiques	154
Tableau 33 Caratéristiques électriques des composants de la PBRES.....	156
Tableau 34 Comparaison des résultats de la simulation avec les valeurs de reference selon le RTCM	157
Tableau 35 Différents flux énergétiques annuels en kWh pour le cas de base dans les villes étudiées	164
Tableau 36 Différents flux énergétiques annuels en kWh pour le cas optimisé dans les villes étudiées	164

Fiche Personnelle

I. Fiche individuelle

Etat civil

MOHAMED TABAA

Né le 17 octobre 1986 à Casablanca, Marocain

37, allée impériale Habous, BP20500 Casablanca, Maroc

Rattachement administratif

MCF et responsable de l'équipe PRI (Pluridisciplinaire de Recherche et Innovation) à l'EMSI, Ecole Marocaine des Sciences de l'Ingénieur

217, Boulevard Bir Anzarane Maarif, Casablanca, Maroc

Tél : 00212 5 22 99 23 23 / 00212 6 61 94 31 74

Email : tabaa.mohamed@emsi-edu.ma

Titres universitaires

2011 – 2014

Doctorat en « systèmes électroniques » de l'Université de Lorraine

Sujet de la thèse : Conception d'un système de transmission ultra-large bande par impulsions orthogonales (Thèse dans le cadre de la coopération EMSI-UL).

Codirection : Pr. Abbas DANDACHE et Dr. Camille DIOU

Composition de jury de thèse

- Prof. Ahmed BOURIDANE (Rapporteur, Université de Northumbria, Newcastle)
- HDR-Dr. Emmanuel SIMEU (Rapporteur, Université de Grenoble)
- Prof. Fabrice MONTEIRO (Examineur, Université de Lorraine)
- Dr. Karim ALAMI (Examineur, EMSI Casablanca)
- Prof. Abbas DANDACHE (Directeur de thèse, Université de Lorraine)
- Dr. Camille DIOU (Co-directeur de thèse, Université de Lorraine)

2010 - 2011

Master Radiocommunications et Systèmes Electroniques Embarqués (RSEE), Université Paul Verlaine de Metz. Mention : bien.

Sujet du mémoire : Evaluation des méthodes d'accès pour les réseaux de capteurs sans fils (Laboratoire LICM).

2006 - 2011

Ingénieur réseaux et télécommunication à l'Ecole Marocaine des Sciences de l'Ingénieur (EMSI) Casablanca, Maroc. Mention : Très bien.

2004 - 2005

Baccalauréat en sciences expérimentales – Lycée Ibn Zaydoun (Casablanca), Maroc.

II. Bilan des activités de recherches

1. Bilan avant soutenance de thèse

En 2010-2011, en parallèle avec ma dernière année d'ingénieur à l'EMSI (Ecole Marocaine des Sciences de l'Ingénieur), j'ai préparé le Master I2E2I / RSEE (Radiocommunications et Systèmes Electroniques Embarqués) délocalisé à l'EMSI, à Casablanca. Ce Master s'inscrit dans le cadre suscité de la **convention** de coopération **d'enseignement** et d'accompagnement à la **recherche en systèmes électroniques** entre l'Université Paul Verlaine-Metz et l'EMSI, initié par le laboratoire LICM (Laboratoire Interface, Capteurs et Microélectronique), sous la direction du Pr. A.Dandache. Ce master m'a permis d'intégrer la recherche scientifique via mon stage recherche au sein du LICM. Par ailleurs, j'ai préparé ma thèse de doctorat de l'Université de Lorraine en **systèmes électroniques** entre 2011-2014, financée par l'EMSI (sous la direction du Pr. Abbas Dandache), dans le cadre de la même convention de coopération entre l'Université de Lorraine et l'EMSI. Durant cette période, mon activité de recherche s'est focalisée plus particulièrement sur les systèmes électroniques communicants sans fils pour les réseaux de capteurs ainsi que leurs architectures. L'objectif principal de la thèse a consisté à développer une architecture de communication robuste pour les réseaux BAN : Body Area Network.

Avant la généralisation des stratégies de communications des objets connectés (IoT : Internet of Things), les réseaux de capteurs ont constitué l'un des terrains où ces stratégies de communication ont été initialement développés, selon diverses architectures fonctionnelles et matérielles, et pour des domaines applicatifs diversifiés, à savoir : médecine, aéronautique, industrie et autres. L'aspect architecture de communication constitue une problématique complexe caractérisée par des exigences qui dépendent le plus souvent de l'environnement d'implémentation du dispositif « Capteur / Objet » concerné. En effet, les architectures de communications sont fortement impactées par l'environnement, la quantité de données, le domaine d'application ainsi que par leurs sources énergétiques et se doivent donc d'être adaptées aux contraintes spécifiques correspondantes. Il devient impératif de rechercher de nouvelles architectures de communications, fiables, robustes et simples à implémenter, en particulier concernant les couches basses, à savoir : modulation et accès au canal. Nous avons, durant ma thèse, proposé une méthodologie de conception architecturale pour les communications impulsionnelle dédiées aux réseaux de capteurs sur la base des techniques de radio impulsionnelle pour les transmissions ultralarge bande (ULB-IR). La technique impulsionnelle proposée repose sur la modulation de la forme d'impulsion. L'approche de conception architecturale proposée se focalise plus particulièrement sur la forme des impulsions et leur génération, qui revêt un intérêt majeur puisqu'elle constitue le support de l'information échangée. L'étude portant sur le choix de la forme d'impulsion nous a conduits à proposer deux approches architecturales différentes. La première approche repose sur les polynômes orthogonaux, et plus particulièrement les polynômes d'Hermite, pour la génération des impulsions en émission, ainsi qu'une architecture de réception basée sur la corrélation pour la détection et la reconnaissance des trains d'impulsions transmis. La deuxième approche architecturale est basée sur l'emploi de la transformée en paquets d'ondelettes discrète selon deux modes d'exploitation différents, mono-utilisateur et multi-utilisateurs. L'emploi de deux architectures dédiées, l'une de synthèse à l'émission et l'autre d'analyse à la réception ouvre une nouvelle orientation pour les communications numériques, permettant à la transformée en ondelettes d'assurer à la fois la génération des impulsions à l'émission et leur reconnaissance à la réception. Un intérêt immédiat de la technique proposée est notamment de faciliter l'exploitation multi-utilisateurs de canaux ultra large bande, et d'autoriser des communications simultanées (« many-to-one », nœuds sources multiples vers un nœud cible) ou du broadcast (« one-to-many », un nœud source vers plusieurs nœuds cibles) sans surcharger la couche

MAC. L'architecture proposée s'inscrit donc à l'interface des couches PHY et MAC et permet de relâcher les contraintes de conception spécifiques à ces couches.

2. Bilan après soutenance de thèse

Ma mission stratégique de recherche s'est poursuivie, toujours avec l'Université de Lorraine, dans le cadre de la même convention de coopération à l'accompagnement de l'EMSI à la recherche en système électronique. Cette stratégie est basée sur des objectifs multiples tels que la mise en place de l'infrastructure de recherche, l'orientation de la thématique, le choix des domaines applicatifs dans le cadre des intérêts stratégiques au Maroc, ainsi que la mise en place de coopérations au niveau national et international pour mutualiser les compétences communes.

A la suite de ma thèse en 2014 et compte tenu du potentiel existant à l'EMSI pour le démarrage, j'ai mis en place (en concertation avec le Pr. A.Dandache) une équipe de recherche composée de 2 MCF et 2 doctorants (actuellement, 16 personnes dont 6 MCF, 3 ingénieurs, 1 secrétaire et 6 doctorants), ainsi que deux plateformes importantes de recherche (« systèmes industriels » et « énergétique »).

Suite à plusieurs actions scientifiques (sujets des doctorants, mise en place et animation de conférences et journées doctorales) et dans le cadre de la même convention de coopération, nous avons défini une thématique de recherche centrale : *Systèmes Electroniques Intelligents et Communicants pour l'industrie du futur*.

Cette thématique couvre des applications diverses (notamment industrielles et énergétiques) et nécessite des compétences pluridisciplinaires. Ceci nous a amené à mettre en place l'équipe PRI (équipe Pluridisciplinaire de Recherche et Innovation) par le renforcement des compétences adéquates ciblant des domaines d'application divers, à savoir : Industrie 4.0, management de l'énergie, science des données. Ce choix de thématiques résulte d'une part, des compétences pluridisciplinaires en systèmes électroniques, traitement de signal, intelligence embarquée et d'autre part, d'une excellente synergie entre la recherche et l'enseignement par le biais de la coopération UL-EMSI. C'est sur les mêmes priorités scientifiques concernant les problématiques pluridisciplinaires que j'ai renforcé mes coopérations au niveau national et international.

A. Au niveau international

Sur le plan du rayonnement scientifique, j'ai pu développer des coopérations avec plusieurs laboratoires et universités à l'international ainsi que mettre en place plusieurs manifestations scientifiques.

Les différentes équipes de recherche avec lesquels les partenariats en question ont été développés sont :

- L'équipe ASC du LGIPM, Université de Lorraine, France (**convention de coopération**) avec les Pr. A. Dandache et Pr. F. Monteiro. Cette coopération se présente principalement sous forme d'un suivi de l'activité, de choix des cibles applicatives en lien avec les systèmes électroniques intelligents communicants, thèses en collaboration (6 thèses par le biais de codirection ACT, le co-encadrements et de participations à l'encadrement), de missions, de projets et d'organisation d'évènements.

- Le laboratoire TIMA de l'Université Grenoble-Alpes, France. Il s'agit d'un partenariat autour du projet SOLARTIGMI, de la thèse de B. Chegari (codirection sous forme d'ACT) ainsi que de l'organisation de plusieurs sessions spéciales de conférence.
- Le laboratoire CRAN de l'Université de Lorraine, France (thèse de A. Jarrou, Bourse de l'EMSI en collaboration avec le Pr. D. Sauter),
- Le laboratoire LIMA, Département d'informatique et d'ingénierie de l'université Outaouais Canada en collaboration avec le Dr A. Oukaira. Cette collaboration a déjà donné lieu à la publication de plusieurs articles ainsi qu'à l'organisation de plusieurs manifestations scientifiques.
- L'Université Centrale en Tunisie. Cette coopération s'inscrit dans le cadre du rattachement de l'EMSI au premier réseau d'enseignement privé d'Afrique (Honoris United Universities) d'Afrique visant à promouvoir l'activité de recherche et d'innovation sur ce continent.

Outre les publications en commun (mentionnées dans la liste des publications), ces coopérations ont donné lieu à l'organisation de plusieurs manifestations et projets scientifiques :

- Technical Program Chair (TPC) de la 27^{ème} édition de l'International Conference on Microelectronics (IEEE ICM15), à Casablanca 20-23 décembre 2015, Maroc.
- Organisateur et Chair de la session « Biomedical » lors de la 27^{ème} édition de l'International Conference on Microelectronics (IEEE ICM15), à Casablanca 20-23 décembre 2015, Maroc.
- Organisateur et Chair de la session « Smart Systems and Devices for Renewable Energy », lors de la 15^{ème} édition de la conférence NEWCAS (New Circuits and Systems Conference), Strasbourg, France.
- Organisateur et Chair de la session « Special session on Renewable Energy: Challenges and Opportunities in Africa », lors de la 30^{ème} édition de l'International Conference on Microelectronics (IEEE ICM18), Sousse, Tunis 2018.
- Organisateur et Chair du Workshop « The future of internet of everything: Design, Implementation and testing », lors de la 16^{ème} édition de la conférence International Conference on Mobile Systems and Pervasive Computing, Halaifax, Canada 2019.
- Président du comité d'organisation de la 4^{ème} édition de la conférence Systol'2019 (International conference on control and fault-tolerant systems), Casablanca, Maroc, 2019.
- Organisateur et Chair de la session « The future of industrial internet of things and applications », lors de la 31^{ème} édition de l'International Conference on Microelectronics (IEEE ICM19), Cairo, Egypte, 2019.
- Organisateur et Chair de la 2^{ème} édition du Workshop « The future of internet of everything: Design, Implementation and testing », lors de la 17^{ème} édition de la conférence International Conference on Mobile Systems and Pervasive Computing, Leuven, Belgique 2020.

B. Au niveau national

Au niveau du rayonnement national, j'ai mis en place plusieurs coopérations ainsi que des événements scientifiques.

Les coopérations mises en place concernent :

- La Fondation de Recherche, Développement et d'Innovation en Sciences de l'Ingénieur FRDISI dont je suis l'initiateur. Il s'agit de la première entité dédiée à la recherche et l'innovation en collaboration avec des industriels au Maroc. Par le biais de cette collaboration, mon équipe

bénéficie chaque année de deux doctorants boursiers ce qui va, dans les années futures, augmenter de manière significative le nombre de chercheurs dans mon équipe. Les thèses en collaboration avec FRDISI sont (plus de détails dans la partie encadrement) :

- Thèse de K. Karboub (Co-encadrement, thèse en cotutelle avec l'Université de Lorraine)
- Thèse de A. Chakir (Co-encadrement, thèse à l'Université Hassan 2)
- Thèse de B. Chegari (Codirection ACT, thèse en cotutelle avec l'Université Grenoble-Alpes)
- Thèse de N. Bahri (Co-encadrement, Université Hassan 2)
- La Faculté des Sciences et Techniques de Mohammedia au Maroc avec Pr. A. Boulmakoul.
- L'ENSA (Ecole Nationale de Sciences Appliquées) de Khouribga avec le Pr. A. Ailane.
- L'ENSA (Ecole Nationale de Sciences Appliquées) de Tanger avec le Pr. H. Badir.

J'ai notamment organisé et coorganisé plusieurs conférences ainsi que des sessions spéciales :

- Initiateur et Organisateur des Journées Doctorales des Sciences de l'Ingénieur (JDSI'14, JDSI'15 et JDSI'16) à Casablanca et JDSI'17 à Marrakech, Maroc (60 participants en moyenne à chaque édition, dont la moitié des doctorants).
- Président du comité d'organisation de la 6^{ème} édition de la conférence INTIS (Innovation and New Trends in Information Systems), Casablanca, Maroc, 2017.
- Président du comité de programme de la 7^{ème} édition de la conférence INTIS (Innovation and New Trends in Information Systems), Marrakech, Maroc, 2018.
- Organisateur et Chair de la session « Internet of Things : components, challenges and opportunities », lors de la 8^{ème} édition de la conférence conférence INTIS (Innovation and New Trends in Information Systems), Tanger, Maroc, 2019.

C. Industriel

Je suis également porteur du projet SOLARTIGMI (budget de 200 000 euros). Ce projet est financé principalement par l'IRESSEN (Institut de Recherche en Energie Solaire et Energies Nouvelles), l'OCP (Office Chérifien de Phosphate) ainsi que par HUU (Honoris United Universities) et l'EMSI dans le cadre de la compétition Solar Decathlon Africa (SDA'2019).

Ce projet s'inscrit dans le cadre de mes coopérations avec l'Université de Lorraine, l'Université Grenoble-Alpes et l'Université Centrale de Tunis. A travers ce projet, nous avons participé à la mise en place de la première plateforme de recherche et d'innovation des bâtiments verts en Afrique, à Benguerir. Ce projet valorise le transfert technologique sur un domaine industriel très promoteur en énergies renouvelables et l'efficacité énergétique des bâtiments.

3. Résumé des activités de recherche à l'EMSI

Au vu des résultats produits par mon équipe, j'ai mis en place, en collaboration avec le département pédagogique sous la direction du Dr K.Alami, un plan de recrutement de docteurs (avec profils en enseignement et en recherche) et de doctorants. Ce plan de recrutement a permis de renforcer l'activité de recherche, en synergie avec la formation d'ingénieurs à l'EMSI. A l'heure actuelle, le nombre de

personnes recrutées est de 6 MCF (dont 3 de thèses soutenues dans le cadre de la coopération avec l'Université de Lorraine), 2 ingénieurs de recherche et 6 doctorants. Ces recrutements ont pour objectif le développement des unités d'enseignement mais également la participation au développement de l'activité de recherche.

Suite à cela, j'ai poursuivi la consolidation de ma coopération avec le partenaire principal (équipe ASC de l'Université de Lorraine) par l'entremise de stages de recherche pour les étudiants de l'EMSI, ce qui a permis d'intégrer la culture de la recherche dans la formation d'ingénierie à l'école (en parallèle avec les Masters délocalisés à l'EMSI). Ces stages ont donné des bons résultats, se poursuivant par des bourses doctorales en France (thèses des A. Hanaf à l'Université de Reims Champagne-Ardenne, A. Bourjilat et A. Khalil à l'Université de Lorraine) ainsi que des bourses de l'EMSI (thèses des K. Bousmar, B. Chouri, S. Saadaoui, A. Jarrou et O. Rholam). Outre les stages de recherche, ma coopération avec la fondation FRDISI de l'Université Hassan 2 a également porté ses fruits (thèses des K. Karboub, B. Chegari, A. Chakir et N. Bahri, boursiers de la FRDISI).

Mon activité de recherche sur le thème principal (systèmes électroniques intelligents et communicants pour l'industrie du futur) se décline en trois axes, auxquels j'apporte ma contribution :

- **Systèmes de communication sans fils en contexte industriel** : développement d'architectures de communications sans fils dans un environnement industriel fortement bruité. Il s'agit, plus particulièrement de développer les architectures fonctionnelles de systèmes de communications sans fils robustes capables d'assurer la transmission fiable de données, systèmes essentiels à l'ère de la numérisation des usines (via la plateforme déjà mis en place à l'EMSI). Il s'agit également du développement des architectures matérielles correspondants sur FPGA.
- **Traitement et analyse des données** : développements d'outils d'aide à la décision par extraction et classification des données ciblant divers domaines d'applicatifs, tels que : prédiction de production d'énergie, pronostic des pannes, estimation LOS/NLOS dans le contexte des communications corporels et la gestion hospitalière connectée. Cet axe constitue un pilier central de structuration de l'équipe PRI sur l'ensemble de ses coopérations.
- **Management de l'énergie propre** : développement d'un axe stratégique au vu de la position du Maroc aujourd'hui dans le secteur énergétique. Cet axe a impacté à la fois la formation et la recherche. Il s'agit : - d'une part de la mise en place d'une plateforme énergétique hybride (2 champs photovoltaïques, l'un monocristallin et l'autre polycristallin), de deux éoliennes (à axe verticale et à axe horizontale) ainsi que d'un système de stockage par batteries ; - d'autre part, du développement de stratégies d'hybridation et de contrôle énergétique ainsi que de l'efficacité énergétique dans le bâtiment (plateforme industrielle à Benguerir).

Ces trois axes de recherche sont très liés les uns aux autres, avec une implication directe sur l'organisation de mon équipe au sein de l'EMSI. Ma contribution, autre que la responsabilité de l'équipe PRI et l'enseignement, se situe plus particulièrement sur le développement des systèmes électroniques communicants et intelligents pour des applications industrielles. Le choix des domaines applications est établi en concertation avec l'équipe ASC, dans le cadre de la coopération UL-EMSI.

Une description détaillée des différents aspects de recherche est introduite dans les paragraphes suivants.

4. Projets de recherche menés / en cours

Conception architecturale

Ce sujet concerne l'étude et le développement des différentes architectures de communication en milieu industriel fortement bruité. Le développement d'architectures de communications pour l'industrie 4.0 nécessite une forte connaissance de la quantité de données devant être envoyées, connaissance qui peut être construite en se basant sur les différentes architectures existantes dans le modèle industriel classique CIM (Computer-Integrated Manufacturing). De multiples évolutions technologiques et innovations se sont succédées ces dernières décennies concernant les systèmes de communication sans fil. Elles permettent progressivement de satisfaire les besoins émergents et croissants des utilisateurs en termes d'accessibilité, de débits et de volumes de données, ainsi que de consommation d'énergie. Ces évolutions permanentes ont pour but non, seulement d'améliorer la connectivité des usagers, mais également d'assurer l'interconnexion d'un nombre croissant d'objets entre eux, se chiffrant potentiellement en milliards. Ces objets connectés sont des éléments matériels physiques autonomes, dotés de capacités de traitement et transmission numériques, leur donnant les moyens de communiquer entre eux. Ceci constitue une révolution technologique permettant d'envisager des innovations plus ambitieuses dans domaines d'application divers.

Dans le monde industriel, une orientation vers des usines connectées, robotisées et intelligentes est en plein essor pour faire face à la concurrence des pays à faible coût de production. La révolution du monde numérique réduit considérablement les limites entre le monde physique et numérique. Ce qui permet de donner vie à des usines interconnectées dans lesquelles les collaborateurs, les machines et les produits interagissent entre eux. Ceci constitue la nouvelle révolution technologique connue sous le nom d'industrie 4.0 avec une vocation purement connectée, suivie par celle de l'industrie 5.0 qui devrait être caractérisée par le retour de la dimension humaine.

Plusieurs caractéristiques doivent être prises en considération pour le développement des aspects architecturaux de communication en milieu industriel. La pyramide de CIM sera la référence des développements de l'ensemble des architectures proposées dans cet axe. En effet, les communications industrielles sont concentrées autour des développements de communications fiables entre les API (Automate Programmable Industriel) et les capteurs actionneurs.

L'étude initiale réalisée sur ce sujet a démontré le besoin de développer des architectures de communications adaptées à un canal de transmission industriel fortement bruité. L'objectif est de participer aux progrès de la révolution « Industrie 4.0 ». L'idée est de proposer des architectures de communication sans fil multi-utilisateurs, fiables et robustes face aux perturbations engendrées par le milieu de propagation de l'environnement industriel (Thèses S. Saadaoui, A. Khalil et O. Rholam).

Ces architectures sont construites à base de réseaux de capteurs sans fil industriels, (IWSN : Industrial Wireless Sensor Network) ou d'objets industriel connectés (IIoT : Industrial Internet of Things), déployés dans un milieu industriel pour assurer la communication entre les différents équipements. Nous avons utilisé la technique de modulation impulsionnelle basée sur la transformée par paquets d'ondelette adaptée aux réseaux de capteurs (travaux de S. Saadaoui) [RV-I192][RV-I161][CI-186][CI-182][CI-181][CI-153][CN-181][CN-172], ainsi que d'autres stratégies orientées IIoT (travaux de O. Rholam) [CI-194][CN-182]. Deux modes de fonctionnement multi-utilisateurs de l'architecture impulsionnelle ont été proposés dans ces travaux selon le type de communication souhaité Many-To-One (MTO) ou One-To-Many (OTM).

L'amélioration de ces travaux a pris forme avec la thèse de A. Khalil [RVI-202][CI-193][CI-183]. Il s'agit de l'intégration des codes correcteurs d'erreur à cette chaîne de communication. Il faut noter que les systèmes de communication sans fils industriels ont besoin de fournir des événements hautement prioritaires, de la manière la plus rapide et fiable comparant avec les réseaux sans fils traditionnel, sans

perte d'informations sur le chemin entre les nœuds de capteurs et le récepteur. Par conséquent, l'utilisation de codes correcteurs d'erreurs « ECC » est une excellente solution pour des communications efficaces, prenant en compte des contraintes de complexité et d'énergie. L'intégration de codes correcteurs d'erreurs offre un meilleur taux d'erreur binaire aux données non codées pour un même rapport signal/bruit radio SNR. Plusieurs ECC ont été étudiés pour les WSN, y compris les codes LDPC, les codes BCH, les turbo-codes, les codes Reed Solomon RS et les codes convolutifs CC pour le contrôle de parité basse densité. Les deux derniers codes se sont avérés appropriés et écoénergétiques pour les réseaux WSN avec une complexité de codage et de décodage raisonnable et simple.

Conception matérielle

Sur cet axe, les recherches se sont focalisées sur le développement et implémentation des plateformes matérielles pour les communications sans fils à base des plateformes FPGA (thèse de M. Chehaitly) [RVI-194][RVI-182] [RVI-171] [CI-191] [CI-184] [CI-151] [CN-171].

Ces dernières années, les FPGA sont devenus une technologie cible populaire pour de nombreuses applications, notamment dans les domaines du traitement du signal et des transmissions. Le développement des plateformes à base de FPGA a conduit vers l'implémentation d'un système de communication IDWPT/DWPT. Les architectures matérielles reconfigurables pour les systèmes de communication sans fils sont basées sur de la transformée en ondelette. L'objectif est d'augmenter la vitesse de traitement en proposant une architecture matérielle configurable en ce qui concernant le nombre d'utilisateurs et le choix de l'ondelette mère (du point de vue architectural, il s'agit implicitement de la taille des bancs de filtres). Les travaux se sont focalisés sur la proposition de nouvelles architectures matérielles permettant d'atteindre des débits élevés sur des plateformes de type FPGA. Les architectures proposées sont modélisées en VHDL au niveau RTL [Register Transfer Level] et indépendantes d'une technologie cible particulière. Elles sont intrinsèquement parallèles et configurables avant synthèse. Les performances sont évaluées après synthèse sur FPGA en termes de débit et consommation de ressources en fonctions des taux d'erreurs. Les pistes privilégiées pour ces nouvelles architectures matérielles reposent sur l'approche pipeline-parallèle pour la réalisation de la transformée en paquets d'ondelettes (quelle qu'en soit la famille). Ces architectures doivent respecter le cahier des charges suivant :

- adaptées au parallélisme ;
- compatibles avec l'accroissement des débits ;
- configurables ;
- utilisables sur des technologies à faible coût.

B. Traitement et analyse des données

Sur cet axe, les recherches se sont focalisées plus particulièrement sur l'analyse intelligente des données selon deux axes stratégiques de développement, à savoir : énergie solaire et gestion hospitalière.

Planification à court terme : Energie solaire

Dans l'architecture de réseau électrique traditionnelle, les gestionnaires de réseau ont accumulé suffisamment d'expérience pour leur permettre de déterminer, à l'aide d'outils statistiques, le montant des réserves d'exploitation nécessaires pour maintenir la fiabilité du réseau. Néanmoins, avec l'introduction des énergies renouvelables (éolien et photovoltaïque), la structure du réseau a changé. Donc, pour maintenir la stabilité du réseau, il devient fondamental de bien connaître les énergies renouvelables. L'état et la production d'énergie peuvent être combinés avec d'autres sources moins

variables et plus prévisibles pour satisfaire les besoins en énergie. Par conséquent, la prévision des énergies renouvelables est un moyen simple d'intégrer en toute sécurité ce type d'énergie dans le réseau électrique actuel, en particulier la prévision de l'énergie photovoltaïque, qui en est encore à ses débuts par rapport à l'énergie éolienne qui a atteint un stade relativement avancé. L'objectif des travaux de thèse de A.Fentis (collaboration de recherche ENSETM-EMSI) [RVI-190][CI-188][CI-172][CN-174], en premier lieu, est de proposer un modèle de prédiction à court terme qui n'utilise que de données recueillies en local. De plus, les performances de plusieurs systèmes non linéaires autorégressifs non linéaires purs sont comparées à ceux des modèles non linéaires autorégressifs avec entrée exogène. Cependant, deux des techniques d'apprentissage statistiques bien connues, à savoir le réseau neuronal « FFNN » et la régression vectorielle de soutien des moindres carrés « LS-SVR », ont été utilisées. Les résultats obtenus sont comparés à ceux d'un modèle de référence.

Planification à court terme : Gestion hospitalière intelligente et connectée

Les crises cardiaques sont l'un des principaux problèmes de santé publique. Selon l'Organisation mondiale de la santé, les cardiopathies ischémiques figurent parmi les dix principales causes de décès. Ainsi, la détection automatique des conditions cardiaques anormales peut conduire à une hospitalisation plus précoce, nécessaire pour les patients souffrant de maladies cardiaques. Dans les travaux de thèse K. Karboub (thèse en cotutelle avec l'UL, boursier de la FRDISI) [RVI-193][CN-191], nous présentons dans un premier temps un algorithme d'apprentissage profond simple mais efficace basé sur des unités convolutionnelles simples et des présentations de fréquence temporelle. Ceci permet de classer trois types de signaux d'électrocardiogramme (ECG) liés à trois situations différentes : les patients atteints d'insuffisance cardiaque congestive, les patients présentant une arythmie et ceux dont le cœur bat normalement. Dans un deuxième temps, un outil d'aide à la décision à travers des objets connectés capable de lier un patient en situation critique à un médecin. Il s'agit d'un écosystème de santé intelligent connectée capable d'une part, de communiquer l'état d'un patient atteint d'une maladie cardiologie à son médecin et d'autre part, de mobiliser tout l'écosystème pour réduire le temps d'attente et d'optimiser la disponibilité des ressources humaines et matérielles.

C. Management de l'énergie propre

La plateforme énergétique que nous avons installée à l'EMSI Casablanca, Maroc, a créé l'opportunité de mettre en place, au sein de mon équipe, un nouveau domaine d'application. Via cette plateforme et la coopération avec des partenaires nationaux et internationaux, j'ai proposé un module d'enseignement pour les filières « automatique » et « génie industriel » à l'EMSI. J'ai pu développer un domaine d'application très promoteur qui représente aujourd'hui l'avenir de l'Afrique et en particulier du Maroc. Deux thèses sont consacrées à cet axe, financées principalement par la FRDISI (thèse de A.Chakir, boursier de la FRDISI) et (thèse de B.Chegari, boursier de la FRDISI, en cotutelle avec l'Université Grenoble-Alpes).

Hybridation énergétique

Une étude initiale sur ce sujet a mis en évidence une forte demande sur la stratégie des énergies mixtes. Les travaux de A.Chakir [RN-195][CHA-192][CI-195][CI-189][CN-183] ont conduit à des modèles optimales d'hybridation énergétique, à savoir : PV-Batterie-Réseau et PV-Eolienne-Batterie-Réseau. Les architectures sont capables de piloter les sources énergétiques et les charges de consommation, et de basculer intelligemment entre plusieurs sources énergétiques. Les travaux de A.Chakir viennent pour proposer des architectures d'hybridation énergétique capables de se connecter ou de se déconnecter du

réseau pour mieux gérer les flux d'énergie. L'idée est de déployer une installation hybride dans une maison déjà raccordée au réseau et d'optimiser la consommation d'énergie en minimisant sa facture énergétique. Cela contribuera à réduire l'impact sur l'environnement via l'utilisation d'énergies renouvelables à la place des sources conventionnelles, ainsi qu'à réduire la facture énergétique mensuelle. En effet, le système comprend un banc de batteries et son convertisseur DC/DC bidirectionnel, une installation photovoltaïque et son convertisseur DC/DC unidirectionnel pour extraire sa puissance maximale, une éolienne et son convertisseur AC/DC, le réseau électrique et son convertisseur AC/DC pour éviter la perte de puissance, le convertisseur DC/AC pour alimenter la charge et enfin les $e_i(t)$ avec $i = \{1,2,3,4\}$, qui représentent l'ensemble des interrupteurs de commande. Le système sera en mesure de gérer son énergie excédentaire tout en l'injectant dans le réseau ou en l'emmagasinant dans le système de stockage sur batterie en vue d'une utilisation ultérieure au cas de besoin.

Efficacité énergétique du bâtiment

Les besoins énergétiques pour le bâtiment au Maroc ont conduit, parallèlement à l'intégration de sources renouvelables dans ce secteur, à chercher les performances énergétiques. Ce secteur représente environ 25% de la consommation totale d'énergie du pays, dont 18% pour le secteur résidentiel et 7% pour le secteur des services. Cette consommation d'énergie devrait augmenter en raison de forte demande sur les appareils ménagers et les installations de CVC (Climatiseur, Ventilateur et Chauffage). Les travaux de B.Chegari [RVI-201][CHA-191][CI-196][CI-197] viennent d'apporter une contribution positive, en étudiant l'impact de la partie passive d'un bâtiment typique marocain de R+1, en particulier celle de l'isolation thermique, sur son autosuffisance énergétique sous différents climats. Le logiciel TRNSYS a été utilisé pour concevoir et développer une plateforme permettant de quantifier cet objectif de manière globale et spécifique. Cette plateforme combine tout un système hybride, basé sur deux sources d'énergie renouvelables nouvelles et propres (éolienne et photovoltaïque), aux charges thermiques du bâtiment. Les résultats montrent d'abord l'impact positif de l'isolation thermique sur la performance énergétique du bâtiment. Ce qui a réduit la demande de chauffage et de climatisation de 21,14%, 29,21% et 22,39% respectivement à Casablanca, Tanger et Marrakech, et a fait du bâtiment la référence en termes de respect du code thermique marocain. Nous avons étudié éventuellement l'importance de la capacité thermique de masse et de la densité des différents isolants thermiques sur la réduction de la demande de chauffage et de refroidissement, ainsi que l'impact positif du système sur la réduction de la consommation d'énergie électrique et des charges électriques, dans les différentes zones climatiques suivant les normes RTCM.

III. Projet scientifique

Mes travaux de recherche s'inscrivent dans le cadre de la convention de coopération scientifique entre l'Université de Lorraine et l'EMSI. Cette mission a pour objectif d'une part, la mise en place d'une activité de recherche et innovation à l'EMSI au Maroc d'autre part, la création d'une synergie forte entre la recherche, l'enseignement et l'industrie dans des secteurs promoteurs en Afrique.



Figure1 Stratégie de l'équipe PRI à l'EMSI

Durant la période 2014-2019, j'ai pu mettre en place, en concertation avec l'équipe ASC de l'Université de Lorraine de Metz, un noyau de recherche et d'innovation. Ce noyau a pour objectif de suivre les mutations technologiques en sciences d'ingénieur, et d'assurer le développement du tissu industriel au Maroc suivant deux axes stratégiques à savoir : la transition numérique et l'énergie. Il était donc nécessaire, dès le départ prendre en compte des domaines d'application transversaux autour de l'axe principal « Systèmes Electroniques Communicants et Intelligents pour l'industrie du futur ». En effet, les travaux accomplis au cours de cette période ont contribué et abouti au développement d'architectures de communications en milieu industriel fortement bruité (application aux usines futures), au traitement et l'analyse des données ainsi qu'au management énergétique pour le bâtiment. Ce développement a valorisé également la formation à l'EMSI pour les trois filières « Ingénierie Informatique et Réseaux », « Automatisme et Informatique Industrielle » et « Génie Industriel ».

Ces années ont contribué à mon développement personnel scientifique en tant que chercheur. Grâce aux différentes interactions avec de multiples acteurs académiques nationaux et internationaux, et à la faveur de mes expériences professionnelles et à la gestion de l'équipe de recherche PRI, j'ai construit un capital humain et scientifique sur lequel je me suis appuyé pour solliciter cette habilitation à diriger des recherches.

Sur le plan de la structuration de l'activité de recherche, il s'agit de poursuivre, dans les meilleures conditions, les travaux de recherche dans mon équipe, ainsi que de renforcer encore la forte synergie qui a été créée entre les différentes axes de recherche mais surtout entre la recherche, l'innovation, l'enseignement et l'industrie (figure 1). Cette stratégie a porté ses fruits à travers les contributions scientifiques, les plateformes de recherche et d'enseignement, la mise en place des stages pour les étudiants ce qui a permis de créer des liens industriels et de valoriser la formation aux nouvelles technologies en collaboration avec le département pédagogique de l'EMSI (figure 2).

Mon projet de recherche s'inscrit en cohérence avec les orientations académiques de l'EMSI autour des sciences de l'ingénieur suite à la convention de coopération avec l'équipe ASC de l'UL, ainsi que les orientations stratégiques du groupe EMSI à travers son attachement au premier réseau panafricain d'enseignement (HUU : Honoris United Universities). Il s'agit donc d'un environnement de développement africain scientifique par excellence. Pour réussir ce projet scientifique, je compte mettre en œuvre des moyens qui s'articulent autour des partenariats de recherche stratégiques, que j'ai pu mettre en place, dont je compte renforcer à l'aide d'autres partenaires mais aussi par le biais des membres du réseau HUU présent au Maroc, Tunisie, Egypte, Afrique de sud et îles Maurice.

Conjointement à ces démarches de structuration de l'activité de recherche en collaboration avec mes partenaires, je travaille activement sur deux pistes stratégiques pour l'EMSI, à savoir : l'innovation et le transfert technologique. Il s'agit d'un élément clé de collaboration avec les industriels locaux ainsi que multinationaux au Maroc. Les industriels africains n'ont pas encore confiance vis-à-vis d'un produit « Made in Africa ». Ce constat m'a permis de mettre en place quelques structures en parallèle avec l'équipe PRI, à savoir : Fablab EMSI Casablanca (un milieu d'innovation par excellence, c'est un laboratoire ouvert pour un porteur de projet), et un incubateur (c'est aussi un accélérateur qui aide les porteurs de projet à passer d'une simple idée à un prototype). Par cette stratégie, je compte d'une part créer de la confiance envers les produits développés en Afrique pour les africains, et d'autre part élargir mon réseau de recherche académique vers de la recherche appliquée en collaboration avec les industriels.

Une autre alternative sur laquelle je compte m'appuyer pour développer mon projet scientifique repose sur les collaborations avec des partenaires stratégiques de l'EMSI comme la fondation FRDISI. Il s'agit d'une première entité de recherche et d'innovation au Maroc, attachée à l'Université Hassan II de Casablanca. Je suis l'initiateur de cette collaboration dont l'EMSI, via l'équipe PRI, est actuellement un membre fondateur. En effet, depuis son lancement en novembre 2017, je co-encadre actuellement trois thèses en collaboration avec le Pr.F.Moutaoukkil (professeur à l'ENSEM de Casablanca) mais aussi une thèse en cotutelle avec le laboratoire UL-LGIPM (Pr.A.Dandache et HDR-Dr S.Dellagi). Il s'agit de la thèse de A.Chakir sur les stratégies d'hybridation énergétique pour des applications aux villes écologique intelligente, dont nous avons pris comme cas d'étude la région Zenata (Zenata eco-city) à Casablanca, Maroc. En continuité de ces travaux, la thèse de B. Chegari porte sur le volet minimisation de la consommation énergétique dans les bâtiments à travers l'enveloppe énergétique, ainsi que sur l'impact environnemental de cette consommation. Nous avons pris le cas de six villes suivant la réglementation thermique des bâtiments au Maroc (RTBM). Les travaux de recherche K.Karboub, en cotutelle avec l'université de Lorraine, s'inscrivent dans le cadre du développement d'un système intelligent d'amélioration du service d'urgence médicale EMS (Emergency Medical Service). L'objectif principal de cette thèse est l'utilisation de l'IoT et de l'intelligence artificielle pour une meilleure prise de décision dans des situations d'urgence internes et externes à l'hôpital. Nous visons en particulier, à développer un système de gestion des ambulances dans un écosystème patient-établissement en état d'urgence médicale. Il s'agit de développer une plateforme avec pour objectif de réduire le taux de mortalité des patients et d'éviter au maximum les séquelles chez un patient qui pourraient résulter de la lenteur de la prise en charge.

J'ai pu mettre en place deux plateformes de recherche et d'enseignement dans des domaines promoteurs : énergétique et industriels. J'ai participé à la construction d'une plateforme de recherche pour les bâtiments verts futurs, lors de la première édition du Solar Decathlon Africa. Il s'agit de la fameuse compétition Solar Decathlon (SDA 2019) dans sa première édition en Afrique (Benguerir, Maroc), qui a pour objectif de mettre en place une première plateforme africaine pour la recherche et l'innovation des bâtiments futur en Afrique. La compétition a eu lieu à Benguerir du 21 août au 13 septembre 2019 (70 Km de Marrakech, au Maroc), dont j'ai pu regrouper un ensemble des partenaires industriels (C3MA, NPSOL, BENZREC et J&M) ainsi que mes collaborateurs académiques (Université de Lorraine, Université de Grenoble-Alpes et l'Université Centrale de Tunis) autour d'un grand projet innovant des bâtiments verts. Nous avons déposé un dossier dans la première phase. Le projet SOLARTIGMI est sélectionné parmi les 20 équipes représentant toute l'Afrique pour l'édition SDA'2019. Durant trois semaines de compétition, nous avons construit une maisonnette de 110 m² à base des matériaux composites et un système d'isolation thermique, la seule source énergétique de la maison est l'énergie solaire. Il faut noter que la maison est aujourd'hui une plateforme de test pour des projets énergétiques : efficacité énergétique, contrôle commande des parcs solaires. Je tiens à signaler

que ce projet est financé d'une partie par l'OCP, IRESEN et UM6P et pour autre partie par l'EMSI, HUU ainsi que les partenaires.

Toutes ces collaborations seront un support pour faire avancer mon projet de recherche qui s'articule autour de deux secteurs applicatifs « industrie 4.0 » et « villes intelligentes », ainsi que des thématiques pluridisciplinaires ciblant en particulier « les systèmes communicants industriels », « le management d'énergie » et « le traitement intelligent des données ».

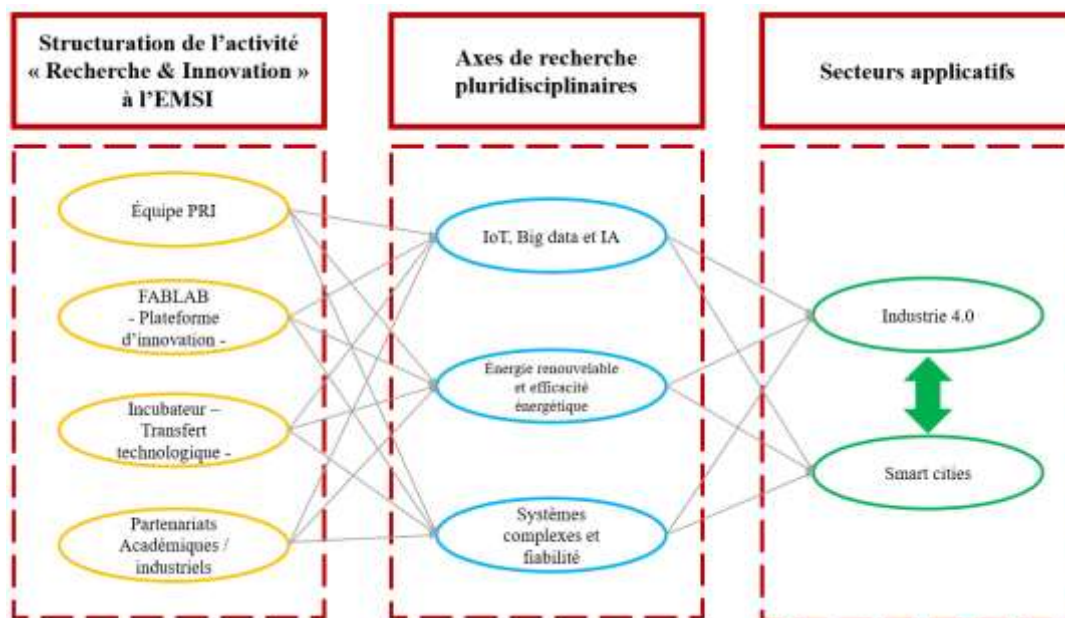


Figure 2 Projet de recherche

J'ajoute que cette demande d'inscription en HDR a pour objectif de stabiliser et renforcer mon équipe PRI ainsi que toute l'activité de recherche et d'innovation à l'EMSI. Il s'agit donc de consolider l'équipe PRI et ses collaborateurs de différentes écoles et universités, et de renforcer les différentes coopérations pour la direction et codirection des thèses officielles.

IV. Encadrement

Depuis mon arrivée à l'EMSI, j'ai codirigé, co-encadré et participé à l'encadrement de 9 thèses :

Codirection de thèses

- 2 thèses (avec ACT) à l'Université de Lorraine (dont 1 en cours)
- 1 thèse (en cours avec ACT) à l'Université de Grenoble-Alpes
- 1 thèse (en cours) à l'Université Hassan 2

Co-encadrement de thèses

- 1 thèse à l'Université de Lorraine

Participation à l'encadrement

- 3 thèses à l'Université de Lorraine
- 1 thèse (en cours à l'Université de Lorraine)

Thèses soutenues (participation à l'encadrement)

Participation à l'encadrement de la thèse de Brahim Chouri (*thèse dans le cadre de la convention de coopération UL-EMSI, financée par l'EMSI*), Doctorat de l'Université de Lorraine, 10 juillet 2016, titre : « Contribution aux méthodes et architectures d'aide au diagnostic et pronostic pour des systèmes instrumentaux intelligents : application à la supervision des machines tournantes ».

Jury : F. Pecheux (Professeur, Paris), E. Simeu (Dr-HDR, Université de Grenoble-Alpes), A. Dandache (Pr, Université de Lorraine), M. Tabaa (MCF, EMSI Casablanca), L. Hebrard (Pr, Université de Strasbourg), F. Monteiro (Pr, Directeur de thèse, Université de Lorraine).

Participation à l'encadrement de la thèse de Mouhamad Chehaitly (*thèse dans le cadre de la convention de coopération UL-EMSI*), Doctorat de l'Université de Lorraine, 29 juin 2017, titre : « Architectures numériques adaptatives pour les systèmes de transmissions sans fils fiables ».

Jury : M. Sawan (Pr, Polytechnique de Montréal), N. Lirida (Pr, Telecom Paris tech), A. Dandache (Pr, Directeur de thèse, Université de Lorraine), L. Hebrard (Pr, Université de Strasbourg), A. Alaa El dine (Pr, Directeur de thèse, Université Libanaise), M. Tabaa (MCF, EMSI Casablanca), F. Monteiro (Pr, Université de Lorraine)

Participation à l'encadrement de la thèse de Aamre Khalil, Doctorat en cours de l'Université de Lorraine (Thèse dans le cadre de la coopération de convention). Directeur de thèse : Pr. F. Monteiro, Co-directeur : Pr. A. Dandache. Intitulé : Architecture configurables massivement parallèles pour le traitement des codes correcteurs d'erreurs.

Jury : HDR-Dr Emmanuel Simeu (Université Grenoble Alpes), Pr. Chafic Salame (Professeur, Université libanaise), Pr. Wilfried Uhring (Université de Strasbourg), Pr. Florence Azais (Chargé de Recherche CNRS, Université Montpellier II), HDR-Dr Mohamed Tabaa (EMSI Casablanca), Pr. Fabrice Monteiro (Université Lorraine), Pr. Abbas Dandache (Université Lorraine).

Thèses soutenues (codirection avec ACT)

Safa Saadaoui, Doctorat en cours de l'Université de Lorraine, (*thèse dans le cadre de la convention UL-EMSI, financée par l'EMSI*), Directeur de thèse : Pr. A. Dandache (50%) et Co-directeur de thèse : Dr M. Tabaa (50%, Avec ACT). Intitulé : Conception d'un système de communication sans fils basé sur la transformée par paquet d'ondelette.

Jury : E. Simeu (Dr-HDR, Université de Grenoble), A. Hayar (Pr, Université Hassan 2 Casablanca Maroc), F. Monteiro (Pr, Université de Lorraine), L. Hebrard (Pr, Université de Strasbourg), A. Dandache (Pr, Directeur de thèse, Université de Lorraine), M. Tabaa (Dr, co-directeur de thèse, EMSI Maroc)

Thèses en cours (Codirection avec ACT)

- Oussama Rholam, Doctorat en cours de l'Université de Lorraine, (*thèse dans le cadre de la convention UL-EMSI*). Directeur de thèse : Pr. F. Monteiro (50%) et Co-directeur de thèse : Dr M. Tabaa (50% avec ACT). Intitulé : systèmes de communication numérique pour les objets connectés industriels.
- Badr Chegari, Doctorat en cours de l'Université Hassan 2, cotutelle avec l'Université de Grenoble-Alpes (*bourse de la FRDISI au Maroc, Thèse dans le cadre de la convention FRDISI-EMSI*). Directeurs de thèse : Pr. E. Simeu et Pr. F. Moutaouakkil et co-directeur de thèse : Dr

M. Tabaa (avec demande ACT). Intitulé : Contribution à l'intégration d'un système de gestion optimal de l'énergie dans un bâtiment intelligent.

Thèses en cours (co-encadrement à l'Université de Lorraine)

- Kaouter Karboub, Doctorat en cours de l'Université Hassan 2, cotutelle avec l'Université de Lorraine (*Bourse de la FRDISI au Maroc, Thèse dans le cadre de la convention FRDISI-EMSI*). Directeurs de thèse : Pr. A. Dandache et Pr. F. Moutaouakkil et Co-directeurs : HDR-Dr S.Dellagi et Dr M. Tabaa. Intitulé : Contribution à l'amélioration des performances des services médicaux urgents appliquant l'IoT et l'intelligence artificielle.

Thèses en cours (Codirection à l'Université Hassan 2)

- Asmae Chakir, Doctorat en cours de l'Université Hassan 2 (*bourse de la FRDISI au Maroc, Thèse dans le cadre de la convention FRDISI-EMSI*). Directeur de thèse Pr F. Moutaouakkil et Co-directeur de thèse : Dr M. Tabaa. Intitulé : Optimisation de l'énergie d'un système hybride dans le contexte de Smart Grid.
- Nissrine Bahri, Doctorant de l'Université Hassan 2 (*bourse de la FRDISI au Maroc, Thèse dans le cadre de la convention FRDISI-EMSI*). Directeur de thèse Pr M. Sadik et Co-directeurs de thèse : Dr M. Tabaa et Dr S. Saadaoui. Intitulé : Conception et réalisation d'un système de transmission sans fils : Application au domaine industriel.

Thèses en cours (Participation à l'encadrement)

- Ayoub Fentis, Doctorat en cours de l'Université Hassan 2 (*thèse dans le cadre de la collaboration UH2-EMSI*). Directeur de thèse : Pr. M. Mestari, Co-Directeur : Dr L. Bahati et Encadrant : Dr M. Tabaa. Intitulé : Méthodes non linéaire autorégressive pour la prévision à court terme des plateformes à énergie solaire.

Master recherche / BAC+5

- Ayoub Rochdi, « Conception et réalisation d'un réseau de capteurs industriel dans le contexte de l'industrie 4.0 », laboratoire LGIPM Metz, France, mémoire de Master GSI soutenu en 2018.
- Oussama Rholam, « Conception d'un système de communication intelligent industriel », LPRI, Casablanca, mémoire d'ingénieur en automatique et informatique industrielle soutenue en 2018.
- Salma Nouari, « Conception et réalisation d'un réseau de capteurs industriel dans le contexte de l'industrie 4.0 », laboratoire LGIPM Metz, France, mémoire de Master GSI soutenu en 2017.
- Wiam El omari, « Optimisation des stratégies de maintenance pour les systèmes offshore », ENIM de Metz, France mémoire Master GSI soutenu en 2017.
- Kawtar El ibrahimi, « Stratégie de maintenance sélective pour les systèmes multi composants : cas où les missions sont de durées incertaines », laboratoire LGIPM Metz, France, mémoire de Master GSI soutenu en 2016.
- Aamre Khalil, « Satisfiabilité du problème industriel », laboratoire LGIPM Metz, France, mémoire de Master GSI soutenu en 2016.
- Khadija Bousmar, « Étude des heuristiques existantes du problème SAT vers une résolution matérielle », laboratoire LCOMS Metz, France, mémoire de Master RSEE soutenu en 2013

Participation aux jurys

J'ai participé à 5 jurys des thèses :

- A. Hanaf, thèse de l'Université de Reims (2015).
- B. Chouri, thèse de l'Université de Lorraine (2016).
- M. Chehaitly, thèse de l'Université de Lorraine (2017).
- K. Bousmar, thèse de l'Université de Lorraine (2018).
- S. Saadaoui, thèse de l'Université de Lorraine (2019).
- A.Khalil, thèse de l'Université de Lorraine (2020).

Je participe chaque année aux différents jurys des stages ingénieur à l'EMSI (15 soutenances par an, dont 2 que j'encadre).

Je participe aux différentes soutenances des stages de master délocalisé à l'EMSI (8 soutenances par an, dont 1 que j'encadre).

V. Activités d'enseignement

Depuis mon arrivée à l'EMSI en 2011, j'ai enseigné un ensemble de cours existant dans le programme de l'EMSI à la hauteur de 120h par an :

- TP informatique, 1^{ère} année tronc commun, cycle d'ingénieur à l'EMSI (80h).
- Cours architecture des ordinateurs, 1^{ère} année tronc commun, cycle d'ingénieur à l'EMSI (60h).
- Cours / TD électronique analogique, 2^{ème} année tronc commun, cycle d'ingénieur à l'EMSI (30h cours + 30h TD).
- Electronique embarqué, cours, TD et projets, 2^{ème} année cycle d'ingénieur, filière IAII (30h cours, 20h TD et encadrement des projets).
- VHDL, cours et TD, 2^{ème} année cycle d'ingénieur, filière IAII (30h cours, 20h TD).

Après l'obtention de mon diplôme de doctorat en 2014, j'ai mis en place un ensemble des cours et de TP en rapport avec mon activité de recherche et en réponse aux besoins industriels du marché marocain. Ces unités de formations concernent globalement trois filières, à savoir : « Génie industriel (GI) », « Automatique et Informatique Industrielle (IAII) » et « Informatique et Réseaux (IIR) » ainsi qu'une unité de module du Master « Génie des systèmes industriels GSI » délocalisé à l'EMSI dans le cadre de la collaboration avec l'Université de Lorraine.

Ce constat m'a amené à m'investir dans la mise en place de nouveaux cours et de nouveaux TP mais également dans la mise en place de quelques plateformes pédagogique de test, notamment :

- Mise en place de la plateforme énergétique à l'EMSI Casablanca. Il s'agit d'une plateforme hybride pour l'enseignement et la recherche constituée de : deux champs photovoltaïque (monocristallin et polycristallin), une éolienne à axe verticale, une éolienne à axe horizontale et un système de stockage par batterie.
- Mise en place de cours et TP de « énergie renouvelable », 2^{ème} année cycle d'ingénieur « Automatique et Informatique Industrielle » (30h de cours + 30h de TP + projets). L'accent est mis dans ces enseignement sur les différentes méthodes d'intégration des énergies renouvelables dans les secteurs industriels et bâtiments.
- Mise en place de cours et TP de « sources énergétiques », 3^{ème} année cycle d'ingénieur « Génie industriel » (30h de cours + 20h de TP). L'accent est mis dans ces enseignement

sur les différentes sources énergétiques (renouvelable et non renouvelable) ainsi que leurs intégrations dans le réseau énergétique intelligent (Smart Grid).

- Mise en place de cours et TP de « efficacité énergétique des bâtiments », 2^{ème} année cycle d'ingénieur « Automatismes et Informatique Industrielle » (30h de cours + 30h de TP + projets). L'accent est mis dans ces enseignements sur l'enveloppe énergétique des bâtiments ainsi que l'intégration des énergies renouvelables hybride.
- Mise en place de cours et TP « Internet Industriel des Objets », 2^{ème} année cycle d'ingénieur « Automatismes et Informatique Industrielle » (30h de cours + 30h de TP). Un accent particulier est mis dans ce cours sur les objets connectés dans un milieu industriel afin de faire lien avec les perspectives de la révolution industrielle « industrie 4.0 ». Il s'agit d'un module de développements des solutions pour les usines futures selon un écosystème industriel allant de l'objet (capteurs / actionneurs) vers la supervision et ERP.
- Mise en place de cours et TP « Internet des objets » 2^{ème} année cycle d'ingénieur « Informatique et réseaux » (30h de cours + 30h de TP). L'accent est mis sur la stratégie de la quantité des données issue des objets connectés et le lien avec les plateformes de stockage massif « Bigdata ».
- Mise en place d'une unité d'enseignement dans le cadre du master délocalisé GSI / 5^{ème} année à l'EMSI, intitulée « Initiation à la recherche scientifique ». L'accent est mis sur les méthodologies de recherche scientifique ainsi que les bonnes manières pour réussir un travail de recherche. Les étudiants sont censés analyser des articles scientifiques et utiliser des plateformes de recherche internationales

VI. Publications

J'ai publié 67 contributions dont :

- 6 revues indexées JCR.
- 15 revues internationales.
- 1 revue nationale concernant l'enseignement.
- 17 conférences internationales IEEE avec comité de lecture.
- 11 conférences internationales Elsevier et ACM avec comité de lecture.
- 8 chapitres de livre.
- 8 conférences nationales.
- 2 livres (proceeding).

Revues internationales (indexée Journal Citation Report)

[RVIJCR-205] M.Tabaa, F.Monteiro, H.Bensag and A.Dandache. Green Industrial Internet of Things from a Smart Industry Perspectives. *Energy Reports* (2020) (Accepted).

[RVIJCR-204] A.Chakir, M.Tabaa., F.Moutaouakkil, H.Medromi, & K.Alami. Smart multi-level energy management algorithm for grid-connected hybrid renewable energy systems in a micro-grid context. *Journal of Renewable and Sustainable Energy*, 12(5), 055301 (2020).
<https://doi.org/10.1063/5.0015639>

[RVIJCR-203] K.Karboub, M.Tabaa, F.Monteiro, S.Dellagi, F.Moutaouakkil. and A.Dandache, Automated Diagnosis System for Outpatients and Inpatients with Cardiovascular Diseases. *IEEE Sensors Journal* (2020). <https://doi.org/10.1109/JSEN.2020.3019668>

[RVIJCR-202] S.Saadaoui, A.Khalil, M.Tabaa, M.Chehaitly, F.Monteiro, & A.Dandache.. Improved many-to-one architecture based on discrete wavelet packet transform for industrial IoT applications using channel coding. *Journal of Ambient Intelligence and Humanized Computing*, 1-9 (2020). <https://doi.org/10.1007/s12652-020-01972-6>

[RVIJCR-201] B.Chegar, M.Tabaa, F.Moutaouakkil, E.Simeu, & H.Medromi. Local energy self-sufficiency for passive buildings: Case study of a typical Moroccan building. *Journal of Building Engineering*, 29, 101164 (2020). <https://doi.org/10.1016/j.jobbe.2019.101164>.

[RVIJCR-200] A.Chakir, M.Tabaa, F.Moutaouakkil, H.Medromi, M.Julien-Salame, A.Dandache, & K.Alami. Optimal energy management for a grid connected PV-battery system. *Energy Reports*, 6, 218-231. (2020). <https://doi.org/10.1016/j.egy.2019.10.040>

Revues internationales

[RVI-202] M.Tabaa, A.Chakir, F.Moutaouakkil, H.Medromi and K.Alami. Non-linear management programming for gridconnected hybrid system combined to E-mobility facility. *International Journal of Renewable Energy Technology* (Accepted).

[RVI-201] A.Chakir, M.Tabaa, F.Moutaouakkil, H.Medromi and K.Alami. Control system for a permanent magnet wind turbine using Particle Swarm Optimization and Proportional Integral controller. *International Review of Automatic Control (IREACO)*. (Accepted).

[RVI-200] S.Saadaoui, M.Tabaa, K.Bousmar F.Monteiro, & A.Dandache. DWPT vs OFDM Under a Noisy Industrial Channel. *Journal of Ubiquitous Systems & Pervasive Networks* Volume 14, No. 1 (2021) pp. 13-17 (<https://DOI: 10.5383/JUSPN.14.01.003>).

[RVI-194] M.Chehaitly, M.Tabaa, F.Monteiro, A.Dandache « *A generic, configurable and efficient architecture for first and second generation discrete wavelet packet transform with ultra-high speed and low-cost FPGA implementation* ». In *APC Journal*, Vol. 2190, No. 1, p. 020090 (2019), ISBN :978-0-7354-1937-7 (<https://doi.org/10.1063/1.5138576>).

[RVI-193] K.Kaouter, T.Mohamed, S.Dellagi, A.Dandache and F.Moutaouakkil « *Full training convolutional neural network for ECG signals classification* ». In *APC Journal*, Vol. 2190, No. 1, p. 020055, ISBN : 978-0-7354-1937-7 (<https://doi.org/10.1063/1.5138541>).

[RVI-192] S.Saadaoui, M.Tabaa, M.Chehaitly, F.Monteiro, A.Dandache « *Discrete wavelet packet transform-based industrial digital wireless communication systems* » *Information Journal MDPI*, 10(3):104, March 2019 (<https://doi.org/10.3390/info10030104>).

[RVI-191] M.Chehaitly, M.Tabaa, F.Monteiro, S.Saadaoui, A.Dandache «High throughput configurable architecture based on IDWPT/DWPT for impulse radio wireless communications» In *APC Journal*, Vol. 2123, No. 1, p. 030023, ISBN:978-0-7354-1863-9 (<https://doi.org/10.1063/1.5117054>).

[RVI-190] A.Fentis, L.Bahatti, M.Tabaa, M.Mestari « *Short-term nonlinear autoregressive photovoltaic power forecasting using statistical learning approaches and in-situ observations* ». *International Journal*

of Energy and Environmental Engineering, Springer 10(2):189-206, June 2019 (<https://doi.org/10.1007/s40095-018-0293-5>).

[RVI-182] M.Chehaitly, M.Tabaa, F.Monteiro, J.Srou, A.Dandache « *FPGA implementation of ultra-high speed and configurable architecture of direct/inverse discrete wavelet packet transform using shared parallel FIR filters* » Advances in Science, Technology and Engineering Systems Journal, 3(5):116-127, September/October 2018 (<http://dx.doi.org/10.25046/aj030516>).

[RVI-181] A.Oukaira, I.Mellal, O.Ettahri, M.Tabaa, A.Lakhssassi « *Simulation and FPGA implementation of a ring oscillator sensor for complex system design* » Advances in Science, Technology and Engineering Systems Journal, 3(1):317-321, January/February 2018 (<http://dx.doi.org/10.25046/aj030138>).

[RVI-171] M.Chehaitly, M.Tabaa, F.Monteiro, A.Dandache « *A novel ultra-high speed and configurable discrete wavelet packet transform architecture* » Advances in Science, Technology and Engineering Systems Journal, 2(3):1129-1136, May/June 2017 (<http://dx.doi.org/10.25046/aj0203142>).

[RVI-161] M.Tabaa « *A novel transceiver architecture based on wavelet packet modulation for UWB-IR WSN applications* » Wireless Sensor Network Journal, 8(9):191-209, September 2016 (<http://dx.doi.org/10.4236/wsn.2016.89016>).

[RVI-152] M.Tabaa, S.Saadaoui, M.Chehaitly, A.Dandache « *NLOS identification for UWB body communications* » International Journal of Computer Applications, 124(6):12-17, August 2015 (<http://dx.doi.org/10.5120/ijca2015905496>).

[RVI-151] M.Tabaa, C.Diou, R.Saadane, A.Dandache « *LOS/NLOS identification based on stable distribution feature extraction and SVM classifier for UWB on-body communications* » International Journal of Ubiquitous Systems and Pervasive Networks, 6(1):27-32, 2015 (<https://doi.org/10.5383/juspn.06.01.004>).

[RVI-131] B.Chouri, F.Monteiro, M.Tabaa, A.Dandache « *Residual useful life estimation based on stable distribution feature extraction and SVM classifier* » Journal of Theoretical and Applied Information Technology. 2013 Sep 30;55(3):299-306.

Revues nationales

[RVN-181] M.Tabaa, K.Alami, A.Dandache, Z.Benabbou, B.Chouri, K.Bousmar « *Initiation à la conception et réalisation d'un réseau de capteurs intelligent : Maison Intelligente* » Journal sur l'enseignement des sciences et technologies de l'information et des systèmes J3eA, volume 16, janvier 2018 (<https://doi.org/10.1051/j3ea/20171018>).

Chapitres

[CHA-204] N.Bahri, S.Saadaoui, M.Tabaa, M.Sadik, H.Medromi (2021) Wireless Technologies and Applications for Industrial Internet of Things: A Review. In: Saeed F., Al-Hadhrami T., Mohammed F., Mohammed E. (eds) Advances on Smart and Soft Computing. Advances in Intelligent Systems and Computing, vol 1188. Springer, Singapore. https://doi.org/10.1007/978-981-15-6048-4_44.

[CHA-203] Elhaloui L., Elfilali S., Tabaa M., Benlahmer E.H. (2021) Toward a Monitoring System Based on IoT Devices for Smart Buildings. In: Saeed F., Al-Hadhrami T., Mohammed F., Mohammed E. (eds) *Advances on Smart and Soft Computing. Advances in Intelligent Systems and Computing*, vol 1188. Springer, Singapore. https://doi.org/10.1007/978-981-15-6048-4_25 .

[CHA-202] M.Tabaa, S.Saadaoui, A.Khalil, M.Chehaitly, F.Monteiro, A.Dandache, Industrial IoT using Wavelet transform. IntechOpen Edition. (Accepted).

[CHA-201] M.Atibi., M.Boussaa., I.Atouf., A.Bennis., M.Tabaa, Hardware Implementation of Roadway Classification System in FPGA Platform. In *International Conference on Smart Applications and Data Analysis* (pp. 200-208). Springer, Cham (2020, June).

[CHA-200] K.Karboub., M.Tabaa, F.Moutaouakkil., D.Sofiene, & A.Dandache(2019, November). Emergency Patient's Arrivals Management Based on IoT and Discrete Simulation Using ARENA. In *International Symposium on Ubiquitous Networking* (pp. 234-244). Springer, Cham.

[CHA-192] A.Chakir, M.Tabaa, F.Moutaouakkil, H.Medromi, K.Alami « *A Combined Source and Demand-Side Energy Management System for a Grid-Connected PV-Wind Hybrid System* » M. Ben Ahmed et al. (Eds.): SCA 2019, LNITI, pp. 1–15, 2020 (DOI:10.1007/978-3-030-37629-1_51).

[CHA-191] B.Chegari, M.Tabaa, F.Moutaouakkil, E.Simeu, H.Medromi « *Shading Devices Benefits on Thermal Comfort and Energy Performance of a Residential Building in Different Climates in Morocco* » M. Ben Ahmed et al. (Eds.): SCA 2019, LNITI, pp. 1–18, 2020 (https://doi.org/10.1007/978-3-030-37629-1_79).

[CHA-181] F.Dkhichi, M.Tabaa, K.Alami, B.Chouri « *Comparison Between Artificial Neural Network and Its Combination with Perturb & Observe as a MPPT Control Method of Photovoltaic System* » Hajji B., Tina G., Ghoumid K., Rabhi A., Mellit A. (eds) *Proceedings of the 1st International Conference on Electronic Engineering and Renewable Energy. ICEERE 2018. Lecture Notes in Electrical Engineering*, vol 519. Springer, Singapore (https://doi.org/10.1007/978-981-13-1405-6_54).

Livres (Proceeding de conference)

[LIV-181] B.Hassan, A.Boulmakoul, M.Tabaa, S.Errouane « *The seventh International Conference on Innovation and New Trends in Information Systems* » Publisher: ENSA Tanger ISBN : 978-9954-34-378-4 ISSN: 2351-9215, at Marrakech Morocco December 2018.

[LIV-171] B.Hassan, A.Boulmakoul, M.Tabaa, K.Alami « *The sixth International Conference on Innovation and New Trends in Information Systems* » Publisher: Faculté des Sciences et Techniques de Mohammedia ISBN : 978-9954-34-378-4 ISSN: 2351-9215, at Casablanca, Morocco, November 2017

Conférences internationales avec comité de lecture et proceeding (IEEE)

[CII-1910] K.Karboub, M.Tabaa, S.Dellagi, F.Moutaouakkil, A.Dandache « *Intelligent Patient Monitoring for Arrhythmia and Congestive Failure Patients Using Internet of Things and Convolutional Neural Network* ». In *2019 31st International Conference on Microelectronics (ICM)* (pp. 292-295). IEEE (2019, December).

[CII-199] M.Atibi., M.Boussaa., I.Atouf, A.Bennis, & M.Tabaa (2019, December). MFCC coefficient and ANN classifier applied to roadway classification. In *2019 31st International Conference on Microelectronics (ICM)* (pp. 44-47). IEEE.

[CII-198] A.Chakir., M.Tabaa., F.Moutaouakkil, H.Medromi, K.Alami Architecture and Methodology for a Grid Connected PV-Battery Hybrid System. In *2019 7th International Renewable and Sustainable Energy Conference (IRSEC)* (pp. 1-6). IEEE (2019, November)..

[CII-197] B.Chegari, M.Tabaa, F.Moutaouakkil, E.Simeu, H.Medroumi «*The impact of the thermophysical parameters of insulation on the energy performance of a building in Morocco*» In IEEE International Conference of Computer Science and Renewable Energies (ICCSRE) (pp. 1-6), July 2019 (DOI: [10.1109/ICCSRE.2019.8807480](https://doi.org/10.1109/ICCSRE.2019.8807480)).

[CII-189] A.Chakir, M.Tabaa, F.Moutaouakil, H.Medromi, K.Alami «*Comparative study of MPPT methods for PV systems: Case of Moroccan house*» 30th IEEE International Conference on Microelectronics, ICM 2018, Sousse, Tunisia, December 16-19, 2018 (<https://doi.org/10.1109/ICM.2018.8704035>).

[CII-188] A.Fentis, H.Bahatti, M.Tabaa, M.Mestari «*Simple model for short- term photovoltaic power forecasting using statistical learning approach*», 3rd IEEE International Conference on Renewable Energies, Power Systems and Green Inclusive Economy, REPS & GIE-2018, Casablanca, Morocco, April 23-24, 2018 (<https://doi.org/10.1109/REPSGIE.2018.8488839>).

[CII-187] A.Oukaira, O.Ettahri, M.Tabaa, A.Lakhssassi «*Development of a Thermal Cooling Model for Complex System Design using Thermoelectric Peltier*» 4th IEEE International Conference on Optimization and Applications, ICOA 2018, Mohammedia Morocco, April 26-27, 2018 (<https://doi.org/10.1109/ICOA.2018.8370558>).

[CII-185] Z.Sabiri, N.Machkour, E.Kheddioui, A.Ailane, M.Tabaa «*A new architecture of energy management applied to hybrid renewable energy system*» 29th IEEE International Conference on Microelectronics, ICM 2018, Beyrouth Lebanon, December 10-13, 2018 (<https://doi.org/10.1109/ICM.2017.8268877>).

[CII-184] M.Chehaitly, M.Tabaa, F.Monteiro, A.Dandache «*A ultra high speed and configurable Inverse Discrete Wavelet Packet Transform architecture*» 29th IEEE International Conference on Microelectronics, ICM 2018, Beyrouth Lebanon, December 10-13, 2018 (<https://doi.org/10.1109/ICM.2017.8268863>).

[CII-181] S.Saasaoui, M.Tabaa, F.Monteiro, M.Chehaitly, A.Dandache, A.Oukaira «*IWSN under an industrial wireless channel in the contexte of industry 4.0*» 29th IEEE International Conference on Microelectronics, ICM 2018, Beyrouth Lebanon, December 10-13, 2018 (<https://doi.org/10.1109/ICM.2017.8268861>).

[CII-173] Z.Sabiri, N.Machkour, E.Kheddioui, A.Ailane, S.Chafik, M.Tabaa «*Management Strategy of a Hybrid Renewable Energy System*», 5th IEEE International Renewable and Sustainable Energy Conference (IRSEC), Tangier, Morocco, 4-7 December 2017 (<https://doi.org/10.1109/IRSEC.2017.8477330>).

[CII-172] A.Fentis, L.Bahatti, M.Tabaa, B.Chouri, M.Mestari «*Data driven Model for Short Term PV Power Forecasting using Least Square Support Vector Regression*» 5th IEEE International Renewable

and Sustainable Energy Conference (IRSEC), Tangier, Morocco, 4-7 December 2017 (<https://doi.org/10.1109/IRSEC.2017.8477401>).

[CII-171] M.Tabaa, A.Dandache, K.Alami «*Hybrid renewable energy installation for research and innovation : Case on Casablanca City of Morocco*» 15th IEEE International New Circuits and Systems Conference (NEWCAS), Strasbourg, France, 25-28 June, 2017 (<https://doi.org/10.1109/NEWCAS.2017.8010187>).

[CII-154] S.Saadaoui, M.Tabaa, F.Monteiro, A.Dandache, K.Alami «*A new WSN Transceiver based on DWPT for WBAN applications*» 27th IEEE International Conference on Microelectronics (ICM), Casablanca, Morocco, 20-23 December, 2015 (<https://doi.org/10.1109/ICM.2015.7437997>).

[CII-153] M.Chehaitly, M.Tabaa, F.Monteiro, A.Dandache, A.Hamie «*A low-cost design of Tranceiver based on DWPT for WSN*» 27th IEEE International Conference on Microelectronics (ICM), Casablanca, Morocco, 20-23 December, 2015 (<https://doi.org/10.1109/ICM.2015.7437983>).

[CII-152] B.Chouri, M.El aroussi, F.Monteiro, M.Tabaa, A.Jarrou, A.Dandache «*Bearing Fault Diagnosis Based on Alpha-Stable Disctribution Feature Extraction and wSVM Classifier*» 27th IEEE International Conference on Microelectronics (ICM), Casablanca, Morocco, 20-23 December, 2015 (<https://doi.org/10.1109/ICM.2015.7438042>).

[CII-151] M.Chehaitly, M.Tabaa, F.Monteiro, A.Dandache «*A fast and configurable Architecture for Discrete Wavelet Packet Transform*» IEEE Conference on Design of Circuits and Integrated Systems (DCIS), Estoril, Portugal, 25-27 Novembe, 2015 (<https://doi.org/10.1109/DCIS.2015.7388599>).

Conférences internationales avec comité de lecture et proceeding (Elseiver)

[CIE-201] S.Saadaoui, K.Bousmar, M.Tabaa, F.Monteiro, A.Dandache «*Performance of IDWPT/DWPT compared with OFDM under an Industrial Channel* ». Procedia Computer Science, 2020, vol. 170, p. 396-402.

[CIE-194] O.Rholam, M.Tabaa, F.Monteiro, A.Dandache «*Smart Device for Multi-band Industrial IoT Communications*» Procedia Computer Science, Volume 155, pages 660-665, 2019 (<https://doi.org/10.1016/j.procs.2019.08.094>).

[CIE-194] Khanboubi, F., Boulmakoul, A., & Tabaa, M. (2019). Impact of digital trends using IoT on banking processes. *Procedia Computer Science*, 151, 77-84.

[CIE-193] A.Khalil, S.Saadaoui, M.Tabaa, M.Chehaitly, F.Monteiro, A.Oukaira, A.Dandache «*Combined Reed-Solomon and Convolutional codes for IWSN based on IDWPT/DWPT Architecture*» Procedia Computer Science, Volume 155, pages 660-671, 2019 (<https://doi.org/10.1016/j.procs.2019.08.095>).

[CIE-192] A.Oukaira, O.Ettahri, M.Tabaa, S.Taheri, A.Lakhssassi «*Simulation, Validation and FPGA Implementation of a Ring Oscillator Sensor for Thermal Management and Monitoring*» Procedia Computer Science, Volume 155, pages 83-88, 2019 (<https://doi.org/10.1016/j.procs.2019.08.015>).

[CIE-186] M.Tabaa, B.Chouri, S.Saadaoui, K.Alami «*Industrial Communication based on Modbus and Node-RED*» *Procedia Computer Science* Volume 130, 2018, Pages 583-588 (<https://doi.org/10.1016/j.procs.2018.04.107>)

[CIE-141] M.Tabaa, C.Diou, R.Saadane, A.Dandache «*LOS/NLOS identification based on stable distribution feature extraction and SVM classifier for UWB on-body communications*» *Procedia Computer Science*, 32:882-887, 2014 (<https://doi.org/10.1016/j.procs.2014.05.506>).

Conférences internationales avec comité de lecture et proceeding

[CI-196] B.Chegari, M.Tabaa, F.Moutaouakkil, E.Simeu, H.Medromi «*Energy savings and thermal comfort benefits of shading devices: case study of a typical moroccan building*» In *Proceedings of the 4th ACM-International Conference on Smart City Applications* (p. 63), October, 2019.

[CI-195] A.Chakir, M.Tabaa, F.Moutaouakkil, H.Medromi, K.Alami «*Optimal control design for a grid connected PV-wind-battery hybrid system feeding residential loads*» In *Proceedings of the 4th ACM-International Conference on Smart City Applications* (p. 63), October, 2019.

[CI-183] S.Saadaoui, M.Tabaa, F.Monteiro, M.Chehaitly, A.Dandache, K.Alami «*Industrial WSN based on Discrete Wavelet Packet Transform for Smart Factory Wireless Communications*» *2st Smart Application and Data Analysis for Smart Cities (SADASC'18)*, Casablanca, Morocco, 27-28 February, 2018 (<https://ssrn.com/abstract=3179221>).

[CI-182] S.Saadaoui, M.Tabaa, F.Monteiro, M.Chehaitly, A.Dandache «*IWSN based on DWPT using an Industrial Noisy Channel for Industry 4.0 Wireless Applications*» *ACM-International Conference on Software Engineering and Information Management, ICSIM2018*, Casablanca, Morocco ,04-06 January, 2018 (<https://doi.org/10.1145/3178461.3178469>).

Conférences nationales (avec comité de lecture et proceeding)

[CN-191] K.Karboub, M.Tabaa, S.Dellagi, A.Dandache, F.Moutaouakkil «*Toward Health 4.0: Challenges and Opportunities*» *8th International Conference on Innovation and New Trends in Information Systems, INTIS'2019*, Tangier, Maroc, 20-21 December 2019.

[CN183] A.Chakir, M.Tabaa, F.Moutaouakkil, H.Medromi, K.Alami «*Vers un réseau électrique intelligent basé sur l'internet des énergies*» *7th International Conference on Innovation and New Trends in Information Systems, INTIS'2018*, Marrakech, Maroc, 21-22 December 2018.

[CN182] O.Rholam, M.Tabaa, F.Moutaouakkil, H.Medroumi, K.Alami «*Internet industriel des objets pour les usines futures : Challenges et Opportunités*» *7th International Conference on Innovation and New Trends in Information Systems, INTIS'2018*, Marrakech, Maroc, 21-22 December 2018.

[CN181] M.Tabaa, S.Saadaoui, F.Monteiro, A.Khalil, A.Dandache, K.Alami, A.Daissaoui «*Distributed industrial communication based on MQTT and Modbus in the context of future industry*» *12th edition of the Conference on Advances of Decisional Systems, Marrakech, Morocco*, 2-3, May, 2018.

[CN174] A.Fentis, L.Bahatti, M.Mestari, M.Tabaa, B.Chouri «*Simple modèle pour prévision de la puissance photovoltaïque à court terme*» *Conférence internationale sur les énergies renouvelables et l'efficacité énergétique*, Fès, Morocco, 8-9 November, 2017.

[CN173] Z.Sabiri, N.Machkoure, E.Khadioui, M.Tabaa «*New architecture of Energy Management Applied to Hybrid Renewable Energy System*» *Conférence internationale sur les énergies renouvelables et l'efficacité énergétique*, Fès, Morocco, 8-9 November, 2017

[CN172] S.Saadaoui, H.Hallal, M.Tabaa, F.Monteiro, A.Dandache, K.Alami «*Internet Industriel des Objets dans le contexte de l'Industrie 4.0 : Etat de l'art*» 6th International Conference on Innovation and New Trends in Information Systems, INTIS'2017, Casablanca, Maroc, 24-25 November 2017.

[CN171] M.Chehaitly, M.Tabaa, F.Monteiro, A.Dandache « *Fast and configurable architecture for discrete and inverse discrete wavelet packet transform* », Colloque GDR SoC SIP 14-16 Juin 2017, Bordeaux France.

Introduction générale

Révolution industrielle

Les technologies de l'information et de la communication (TIC) constituent la base sur laquelle sont créées les solutions novatrices de demain. Les systèmes embarqués intelligents et l'internet constituent en particulier deux grands acteurs qui font progresser les technologies des TIC. Ces technologies ont permis des innovations dans plusieurs secteurs, notamment aux industriels, ç savoir : médical, production, automatisation, énergie et autres.

Au cours des révolutions industrielles successives, l'objectif n'a pas été uniquement pour l'industrie de s'améliorer et de satisfaire ses besoins directs, il a également été d'améliorer le niveau de vie de la société et de faciliter la vie du consommateur. Par conséquent, la croissance économique devrait toujours aller de pair avec chaque révolution industrielle. L'industrie médicale, l'économie de l'énergie et, notamment les technologies de production, seront transformées à travers de nouveaux modèles de chaînes de valeur. La mondialisation, l'urbanisation, l'évolution démographique et la transformation de l'énergie sont les forces transformatrices estimant l'impulsion technologique pour une meilleur identification des solutions pour un monde en mouvement. Depuis quelques années, les révolutions successives apportent des contributions remarquables à la qualité de vie d'une personne, à la sécurité, à l'économie de l'industrie, au confort et à la santé de l'être humain. En effet, ce croisement pluridisciplinaire des domaines joue un rôle important dans la lutte contre les défis fondamentaux posés par les changements démographiques, la disponibilité des ressources naturelles, la mobilité durable et le changement climatique.

Aujourd'hui, l'industrie 4.0 est mise en place pour définir un système qui a évolué d'une installation automatisée contrôlée par ordinateur à un système qui traite les données en masse. Ceci permet de fournir des décisions intelligentes dans une approche automatisée pour améliorer un secteur industriel, ainsi que le mode de vie d'une société. L'initiative adoptée par le gouvernement allemand, concernant l'industrie 4.0, a eu pour objectif d'intégrer les nouvelles technologies dans le secteur industriel.

Il est généralement admis que le secteur industriel est passé par 4 révolutions. De 1760 à 1880, la première révolution industrielle a été initiée par James Watt en Angleterre avec le développement de la machine à vapeur. De 1880 à 1950, l'utilisation de nouvelles sources d'énergie comme le gaz, l'électricité et le pétrole a contribué à la deuxième révolution industrielle. A partir des années 50, au progrès de l'industrie sont principalement dus à l'électronique avec l'arrivée des transistors et des microprocesseurs mais aussi des télécommunications et de l'informatique. Cette révolution a conduit au développement du secteur aérospatial et de bien d'autres. Depuis 2010, et après ces trois révolutions industrielles successives (mécanisation, production de masse et numérisation), l'heure est à une quatrième révolution avec les usines intelligentes.

Les objets connectés, le big data, la cybersécurité, les cobots et l'intelligence artificielle constituent les principaux catalyseurs de l'industrie du futur. Ces technologies sont aujourd'hui dans la phase la plus importante de leur développement. Par conséquent, le principal défi consiste à développer les technologies appropriées, capable de répondre immédiatement aux exigences du marché, et d'offrir une grande flexibilité dans de multiples environnements. Compte tenu de l'intérêt croissant pour ces objectifs, cette révolution connaît actuellement des phases initiales exploratoires et les universitaires ont commencé à mettre en place des approches pédagogiques dans ce sens. En parallèle, plusieurs travaux ont commencé éventuellement à faire éventuellement avancer le modèle scientifique vers l'industrie 5.0 (impact de la robotique sur la vie humaine).

Les théories modernes suggèrent que la croissance économique dépend de la diffusion et de l'adoption de nouvelles technologies, basées sur des compétences pour les créer et les appliquer d'une façon mutuelle. C'est sur cette base que le Japon, par exemple, a défini le terme Société 5.0, qui fait référence à une société moderne utilisant efficacement les objets connectés, big data et l'intelligence artificielle, dans le but d'améliorer l'économie et la qualité de vie, où les technologies et les organisations dans leur ensemble sont des composantes majeures de ce modèle.

Par ailleurs, le monde passe par une nouvelle ère, une ère de mondialisation et d'évolution des technologies numériques et de *high-tech* et de *fin-tech*. Cette évolution introduit des changements aussi bien dans des secteurs verticaux que directement sur la société. L'environnement et les valeurs des citoyens sont de plus en plus diversifiés et complexes. Les révolutions mondiales, « industrie 4.0 », « made in Chine 2025 » ou « society 5.0 », visent à développer des activités ciblant les nouvelles technologies numériques. En effet, la transformation numérique est l'élément clé de l'ensemble de ces activités. Cette transformation numérique est aujourd'hui un élément stratégique pour l'industrie.

Cependant, l'humanité vit dans une période d'incertitude difficile, marquée par une complexité croissante et la transition numérique. Il est donc essentiel de recourir à des moyens efficaces pour résoudre les problèmes de la société, en créant une meilleure vie pour les gens, et de maintenir une croissance économique.

Il est clair que la combinaison des technologies associées à cette nouvelle révolution technologique est capable de créer un impact réel sur les systèmes de fabrication industriels actuels et même futurs. Mais, il reste encore beaucoup d'approches à explorer et à réaliser pour les valider, ce qui fait que la majorité des industriels sont toujours en phase exploratoire.

Contexte et contributions

La thématique de recherche au sein de mon équipe PRI à l'EMSI est centrée sur le développement de systèmes électroniques intelligents pour l'industrie du futur. Ce choix de thématique a été motivé par les compétences de l'équipe et de la formation en sciences de l'ingénieur d'une part, et d'autres part, par l'excellente synergie qui j'ai pu créer entre la formation, la recherche et les collaborations.

La mise en place et le suivi des coopérations, nationales et internationales, des unités d'enseignement pour des domaines applicatifs en lien avec l'industrie, dans l'intérêt stratégique au Maroc et infrastructure de recherche au sein de l'EMSI, ont servi de point de départ à une orientation vers l'industrie du futur. Ce choix de thématique est lié à la solide coopération avec l'équipe ASC de l'Université de Lorraine.

Progressivement, j'ai orienté mes activités de recherche vers un thème fédérateur, ciblant les systèmes électroniques intelligents communicants pour des applications industrielles dans divers domaines d'applicatifs. Ce choix est décliné en trois sujets principaux auxquels j'apporte ma contribution :

- les architectures de communication dans un environnement industriel fortement bruité ;
- le traitement intelligent des données utilisant les différentes méthodes de l'intelligence artificielle ;
- la gestion des énergies mixtes connectés au réseau pour les bâtiments futurs.

Ce manuscrit comporte une introduction générale, une partie état de l'art sur l'industrie du futur, trois parties principales et une conclusion et perspectives.

L'introduction (chapitre en cours), a posé la problématique générale de ce travail en commençant par présenter l'intérêt et l'historique des différentes révolutions industrielles de l'origine jusqu'à nos jours. Conjointement ont été introduits les champs d'application et les visions de différents modèles d'inspiration allemande. L'impact de la transformation numérique au cœur de ces révolutions a également été discuté, faisant ressortir les points clés ayant contribué à ses révolutions. Les travaux présentés dans ce manuscrit ont ensuite introduit dans le contexte du thème principal : « systèmes électroniques intelligents communicants pour les applications industrielles ».

La partie « *industrie du futur* » est consacrée au développement actuel des révolutions industrielles. Les motivations et objectifs de trois modèles industriels révolutionnaires, à savoir : « industrie 4.0 », « society 5.0 » et « made in china 2025 », ont été présentés. L'accent est mis sur les différentes pratiques existantes aujourd'hui pour réussir la mise en place des nouvelles technologies au sein verticaux industriels, suivi par les différentes orientations dans le cadre de l'industrie du futur.

La partie « *système de communication industriel sans fils* » est consacrée aux travaux en relation avec les systèmes de communication sans fils en un milieu industriel, et ceci pour les deux aspects architecturaux fonctionnel et matériel. Dans le chapitre 2.1, l'accent est mis sur les transmissions sans fils à l'ère de l'industrie 4.0. Il s'agit du développement de deux architectures de transmission : Many-to-One et One-to-Many. Ces architectures sont basées sur l'emploi de transformée en ondelette, comme composante centrale de l'émetteur et du récepteur. Les architectures ont été testées sur deux types de canaux : un canal à bruit blanc additif et un canal industriel fortement bruité. Naturellement, l'amélioration de différentes architectures est assurée via l'intégration de codes correcteurs d'erreurs au niveau de la source, ce qui a permis d'améliorer la réception. Dans le chapitre 2.2, l'accent est mis sur l'aspect implémentation matérielle des architectures de la transformée en ondelette, pour l'émission et la réception, sur des cibles FPGA. Plusieurs architectures ont été proposées ciblant la réduction du coût de mise en œuvre, l'élimination des besoins en mémoire, réduction du nombre de DSP requis et la mise en œuvre des nouveaux filtres FIR. Suite à cela, une architecture générique IDWPT/DWPT a été proposée pour l'ensemble des sujets traités ciblant ainsi les transmissions fiables sans fils.

Dans la partie « *traitement intelligent des données* », l'accent est mis sur l'analyse et le traitement des données pour une meilleure prise de décision. Les travaux des thèses relatifs à cette partie ciblent le développement des algorithmes intelligents pour deux secteurs promoteurs : gestion hospitalière et prédiction énergétique. Dans le chapitre 3.1, l'accent est mis sur l'automatisation du diagnostic pour les décisions cardiologiques. Le principe repose sur le

fusionnement de plusieurs méthodes d'extraction (CWT, DWT, MODWT et AM), compte tenu de la nature complexe des données. L'objectif est d'obtenir une meilleure classification des données en se basant sur méthodes d'analyse de données telles que SVM, CNN, QD, KNN et Naïve Bayes. Dans ce but, une base de données a été créée, à partir d'une douzaine de volontaires non-fumeurs (soit neuf hommes et trois femmes). Les résultats de simulation ont montré que la combinaison DWT et discriminateur quadratique donne les meilleures performances avec une précision de 99,92%, et un intervalle de confiance de 99,07% à 100%, un niveau de certitude 0,99 et un coût de classification de 1,5. Quant aux travaux du chapitre 3.2, ils ciblent développement d'un modèle de prévision hors ligne à court terme utilisant des données collectées en local. Il s'agit de combiner la simplicité des modèles des séries temporelles et la non-linéarité des modèles d'apprentissage statistique. Les tests ont été réalisés sur la base de données issues de la plateforme installé à l'EMSI Casablanca.

La partie « *management des énergies dans le bâtiment* », l'accent est mis sur le management des sources énergétiques renouvelables hybrides pour un habitat efficace. Les travaux des thèses relatifs à cette partie ciblent d'une part, le développement d'architectures hybrides connectés au réseau de distribution national, d'autres part, l'étude de l'impact de l'isolation thermique afin d'optimiser l'énergie des charges consommatrices d'un bâtiment typique. Dans le chapitre 4.1, plusieurs architectures sont proposées visant l'hybridation des sources énergétiques hybride pour le contrôle et le basculement entre différentes sources. L'architecture PV-Eolienne-Batterie connectée au réseau est présentée dans ce chapitre. L'objectif principal est le développement d'un système intelligent de contrôle pour une meilleure gestion énergétique à la source et à la demande. Une gestion micro-réseau des maisonnettes connectés est développé capable d'une part, de valider les différentes architectures proposées, et d'autres part, d'assurer le partage collaboratif d'énergie entre différentes maisonnettes d'une même zone. Les travaux présentés dans le chapitre 4.2 ont visé le développement d'une plateforme permettant d'évaluer l'impact de la partie passive du bâtiment sur son autosuffisance énergétique. L'étude a été faite sur la base d'un bâtiment marocain typique de R+1. Le bâtiment est alimenté par une source hybride (PV-Eolienne) avec un système de stockage par batterie. Les simulations ont été faites à l'aide de la plateforme TRNSYS, sous différents climats au Maroc. Les résultats obtenus mettent en évidence l'impact de l'isolation thermique sur l'autosuffisance énergétique du bâtiment, et ceci sous les différents climats étudiés.

Le manuscrit se termine par un chapitre de conclusion et de perspectives.

Partie 1 L'industrie du futur

I. Introduction

« L'industrie du futur » vient pour accélérer la modernisation de l'outil industriel, dans le cadre du déploiement des nouvelles technologies. Il ne s'agit pas d'un simple déploiement des capteurs, cobots ou d'outils innovants, mais bien surtout d'un important coup de pouce envers la numérisation des secteurs industriels. L'industrie du futur est le catalyseur de la révolution du modèle industriel, changeant ainsi la structuration et les interactions pour une excellente agilité dans l'usine. Ceci ne pourra être assuré qu'à travers une meilleure utilisation des technologies et des données, pour une meilleure intégration dans l'écosystème industriel.

Les robots collaboratifs, les algorithmes de traitement des données, les défis énergétiques et les outils technologiques avancés doivent collaborer pour la refondation du modèle industriel. Ils constituent une opportunité pour d'améliorer l'attractivité de différentes applications industrielles. Quant à l'impact de cette évolution sur l'économie d'un pays, plusieurs exemples montrent qu'une modernisation et numérisation de l'industrie concourt, de manière significative et durable, à l'amélioration de l'économie. Les modèles chinois et japonais illustrent les vertus de cette industrie du futur sur leurs stratégie économique.

Cependant, la transformation numérique des entreprises constitue aujourd'hui une étape primordiale pour le développement de l'industrie ainsi que l'économie. Cette transformation numérique industrielle a été initiée par le gouvernement allemand à travers la quatrième révolution industrielle désignée par « industrie 4.0 » ou « Smart Manufacturing ». Cette transformation a été la source d'inspiration et de changement pour d'autres initiatives mondiales, notamment les forces économiques chinois et japonais. Cette révolution apporte des changements radicaux aussi bien sur les systèmes et les process, mais également au final sur les stratégies de gestion, les modèles d'affaire et la main-d'œuvre.

Cette transformation a complètement changé le mode de fonctionnement des usines. Ces dernières ont besoin aujourd'hui d'employés capables de comprendre, d'utiliser et de développer de nouveaux modèles de travail. Les enjeux de cette transformation se caractérisent par une maîtrise de la numérisation des process, une redéfinition des métiers, une bonne analyse des données et une intégration agile au sein de l'entreprise.

Cette première partie du manuscrit vient détailler la thématique principale que j'ai mise en place au sein de l'équipe de recherche PRI concernant les applications intelligentes pour l'industrie de futur. J'y présente l'état des lieux concernant d'une part l'évolution de l'industrie dans le monde à travers le modèle initial industrie 4.0 ainsi que ses dérivés : Society 5.0 et MIC2025. J'y traite également les différents outils et orientations pour un meilleur accompagnement de cette transformation industrielle. L'état des lieux y est présenté concernant d'une part, l'évolution de l'industrie dans le monde. Les différents outils et orientations pour un meilleur accompagnement de cette transformation industrielle y sont également abordés.

II. Industrie 4.0 et 5.0

L'industrie 4.0 est caractérisé par un nouveau mode d'organisation de l'entreprise pour mettre fin aux structures hiérarchiques complexes. Il est donc nécessaire de fusionner les techniques des TIC avec les technologies industrielles. Dans l'industrie 4.0, les systèmes embarqués, les technologies IoT et le CPS relie l'espace virtuel au monde physique pour donner naissance à une nouvelle génération d'usines

connectées dites « intelligentes ». Ces usines assurent une allocation plus efficace des moyens de production, les objectifs principaux étant de personnaliser les produits, de minimiser les délais de livraison sur le marché et d'améliorer les performances de l'entreprise. Le concept d'industrie 4.0 a été introduit pour la première fois lors du salon de la technologie industrielle de Hanovre en 2011, la plus grande foire technologique et industrielle au monde [LU17]. En 2013, l'Allemagne adopte officiellement la mise en œuvre du concept par l'identification, par le gouvernement, du projet d'industrie 4.0 dans ses futurs projets au sein de son plan d'action « stratégie de haute technologie 2020 » [LAS14]. Elle a rapidement transformé en stratégie nationale allemande basée sur 4 aspects : construction du réseau CPS, examen de deux thèmes centraux basés sur l'usine et la production intelligente, réalisant ainsi 3 types d'intégration : horizontale, verticale et de point-à-point. En outre, l'industrie allemande a accueilli l'initiative à bras ouverts. Les petites, moyennes et grandes entreprises de tous les secteurs d'activité ont participé à la création de cette nouvelle ère. Le coup de pouce du gouvernement a permis d'internationaliser le concept d'industrie 4.0. En 2014, le Conseil d'État de la Chine a dévoilé son plan national, Made-in-China 2025, inspiré de celui d'industrie 4.0, et conçu pour améliorer globalement l'industrie chinoise, en intégrant les technologies numériques et industrielles. Parallèlement, plusieurs pays ont adopté ce concept. A titre d'exemple, on peut citer « la nouvelle France industrielle » pour la France et « industrial internet and advanced manufacturing partnership in USA » pour les Etats unis [SKO17].

L'industrie 4.0 va permettre aux entreprises de se lancer dans la conception et la mise sur le marché de produits et de services novateurs, qui ne pouvaient jusqu'à présent être envisagés que par certains géants de l'industrie. Citons ci-dessous quelques bénéfices de l'industrie 4.0 :

- surveiller et contrôler les machines et équipements en temps réel ;
- introduire des procédés intelligents en utilisant des machines capables d'analyser leurs propres données pour prévoir par exemple, à quel moment leur entretien doit être effectué ;
- optimiser la « supply chain », par la traçabilité des produits, le suivi logistique et la maîtrise des stocks ;
- éliminer le papier en numérisant les instances des processus de l'usine (les processus réels, en cours d'utilisation), ce qui permet de vérifier leur conformité avec les processus conçus ;
- renforcer la valeur des produits en développant de nouvelles gammes de produits intelligents pour gagner de nouveaux marchés ;
- optimiser la consommation d'énergie par l'utilisation intelligente des différentes ressources nécessaires à l'industrie ; ceci n'est réalisable qu'en adoptant une vision globale sur l'usine et les équipements utilisés afin de mieux gérer et optimiser leur consommation d'énergie.

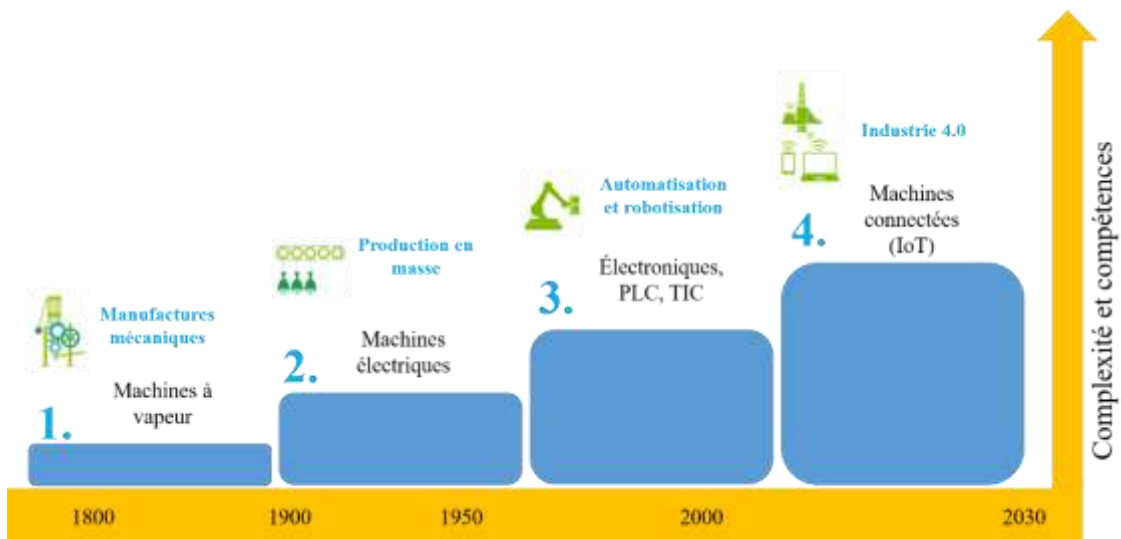


Figure 3 Evolution de l'industrie

Cette récente transformation numérique a donné naissance à une série d'engagements au sein des organisations, nécessitant un nouvel ensemble de compétences des employés. Dans le cadre de cette innovation des process, il devient de plus en plus urgent de créer la main-d'œuvre de demain, dotée de compétences innovantes [OZD18] [NAH19]. Le défi consiste principalement à trouver le bon employé pour le bon emploi et le bon poste. Mais surtout, il s'agit de mettre en place un système collaboratif entre la machine et l'être humain. C'est dans cette logique que l'industrie 5.0 est introduite, pour répondre d'une part à ce besoin humain-machine, et accompagner d'autres part cette révolution industrielle dans plusieurs secteurs. L'industrie 5.0 ou « industries collaboratives » a pour objectif d'induire un nouveau concept de coopération entre l'homme et la machine. Son intégration dans un écosystème industriel innovant vient mettre l'accent sur trois points essentiels, à savoir :

- les robots collaboratifs, dénommés « cobots », conçus pour améliorer le mode de vie de l'homme ;
- l'amélioration l'efficacité et de la productivité humaines en optimisant les interactions homme-machine ;
- la vulnérabilité aux risques systémiques, tels que les pannes induite par l'automatisation extrême.

III. Society 5.0

La spécification « société 5.0 » a été rédigé dans le 5^{ème} plan de base pour la science et la technologie par le Conseil de la science, la technologie et l'innovation. Il a été initié et lancé par le gouvernement japonais. Il est possible de définir les étapes successives des sociétés en les replaçant dans l'histoire de l'humanité. La « société 1.0 » peut être définie comme celle des groupes de personnes chassant et cueillant en coexistence harmonieuse avec la nature. La « société 2.0 » a constituée de groupes reposant sur la culture agricole, marquée par une organisation croissante et l'émergence de la notion de nation [FUK20] [BAL20]. La « société 3.0 » est caractérisé par une société qui favorise l'industrialisation par le biais d'une révolution industrielle, ayant pour objectif la production de masse. Quant à la « société 4.0 », il s'agit d'une société de l'information qui produit une valeur ajoutée importante en connectant des actifs immatériels tels que les réseaux d'information. La « société 5.0 », enfin, est une société de

l'information construite sur les principes de la « société 4.0 », mais centrée sur l'être humain. Ce qui a permis de créer des capacités industrielles importantes, et ceci en plusieurs secteurs diversifiés, tout en impactant directement les citoyens [SAL19].



Figure 4 Modèle industriel japonais

La « société 5.0 » a donc pour objectif de créer un modèle de développement centrée sur l'homme, ce qui nécessite de relever des défis multiples d'ordre tant économique que sociétal. Les citoyens devront pouvoir jouir d'une meilleure qualité de vie, pleinement active et confortable. Cette société aidera en particulier à répondre aux différents besoins des personnes, indépendamment de la région, de l'âge, du sexe, en fournissant les moyens et les services nécessaires. Ceci a permis de créer de nouvelles valeurs ainsi que des solutions pour de meilleures solutions aux problèmes. Donc, l'idée de cette initiative est de créer une nouvelle société autour de l'être humain, tout en résolvant diverses problématiques sociétales. Il faut absolument noter que cette stratégie de croissance japonaise est la même que celle des SDG (Sustainable Development Goals). Grâce à cette stratégie innovante, les défis auxquels le Japon est confronté, tels que le vieillissement de la population, le déclin de natalité, la diminution de la population et le vieillissement des infrastructures, sont des défis que de plus en plus de pays ont à relever. Le Japon est considéré comme l'une des premières nations à relever ces défis. Via la résolution de ces défis par la société 5.0, et par le partage des solutions avec le monde. Le Japon a pu contribuer à la résolution de défis similaires dans le monde entier ainsi qu'à la réalisation des SDG.

IV. Made in China 2025

En 2015, le gouvernement chinois a lancé le concept MIC2025 (Made in China 2025). C'est une initiative visant à moderniser la capacité industrielle de la Chine. Cette stratégie, lancée sur 10 ans, est fortement axée sur la fabrication intelligente dans 10 secteurs stratégiques (figure 5). Cette stratégie vise également à améliorer la position de la Chine, en tant que puissance mondiale, dans les industries *high-techs* telles que la robotique, l'aviation et les véhicules à énergies nouvelles comme l'électricité et le biogaz. Ce plan repose plus particulièrement sur la recherche et le développement et est considéré comme un élément essentiel de la stratégie durable de la Chine en matière pour une excellente croissance et compétitivité pour les années avenir, lui assurant une transformation en une économie développée [CLA19][LIN20][KOL20].



Figure 5 Stratégie Made in Chine 2025

MIC2025 consiste à limiter, par ses propres innovations, la dépendance de la Chine vis-à-vis des importations de technologies étrangères. Il s'agit de créer des entreprises chinoises à même de soutenir la concurrence, quel que soit nationale ou internationale, l'accent est mis sur le processus national de fabrication. Dans ce cadre, la Chine souhaite augmenter sa production, non seulement au niveau des composants essentiels, mais aussi des produits finaux. Cette stratégie repose le renforcement de la qualité, l'accroissement de l'investissement, orientée vers l'innovation technologique (plutôt que la réplique technologique difficile à réaliser via la rétro-ingénierie) et de la fabrication intelligente (avec la contribution de l'apprentissage automatique « machine learning »). Cette approche dite intelligente consiste à combiner aux outils classiques de la fabrication l'apport de l'internet et des capteurs sans-fils ainsi que la robotique, pour en améliorer l'efficacité, la qualité et la productivité. Cette stratégie chinoise s'inspire visiblement de l'initiative allemande « industrie 4.0 ». Elle est largement conforme aux approches allemandes et japonaises en matière d'économie, de développement et d'innovation.

V. Avancées technologiques à l'ère de l'industrie du futur

Grâce à l'évolution des technologies d'automatisation et de numérisation l'usine devient intelligente. L'industrie se modernise en anticipant les besoins de la production. Cette révolution industrielle est soutenue par les nouvelles technologies et les nouveaux métiers qui émergent dans le sillage des évolutions de l'industrie et des services. L'industrie du futur dispose de plusieurs atouts pour faire évoluer toute la chaîne de valeur d'un pays. Les avancées technologiques participent activement à la réussite de l'industrie du futur. Nous présentons ici les éléments clés, pluridisciplinaire, qui ont contribué à la mise en place des révolutions industrielles au niveau mondiale.

1. Internet industriel des objets

Le déploiement de l'IoT en milieu industriel est connu par l'IIoT (Industrial Internet of Things). Par l'entremise des technologies qu'elle embarque (capteurs, actionneurs, puce de communication), l'IIoT est en mesure de faire communiquer tous les objets entre eux. Ces objets échangent une quantité considérablement une grande quantité de données, véhiculées par des transmissions sans fil ou l'internet.

Trois types d'objets peuvent être distingués, à savoir : les objets connectés via internet, objets connectés par le biais d'un protocole de communication sans fil ou via internet [ZHA20] [SIS20]. Il faut noter que l'IIoT est à la base du concept d'usine intelligente, ayant pour objectif de faciliter l'échange et la coordination entre différents acteurs collaborant. Son déploiement assure d'une part, des gains de productivité dans l'industrie et d'autre part, une haute accessibilité aux informations utiles pour une meilleure prise de décision. L'un des défis majeurs de l'IIoT est le choix des stratégies de communication pour garantir la transmission fiable de l'information dans un environnement fortement bruité (du point de vue électromagnétique) [YOU20][BUC20][OST20].

Malgré les promesses et nouvelles opportunités offertes par l'internet des objets, divers défis pourraient entraver l'adoption et l'intégration de ces nouvelles technologies sans fil :

- **connectivité** : considérée l'un des défis majeurs, la plupart des installations présentes dans les usines, y compris les capteurs, ne disposant pas de capacité de communication IP ;
- **nature bruitée du milieu industriel** : bien que l'IIoT ait été implémenté avec succès dans un certain nombre d'industries, les architectures de communication restent difficiles à réaliser en raison de la nature hostile et contraignante des environnements industriels (topologies dynamiques, énergie limitée, humidité extrême, poussière épaisse, etc) ; une conception robuste est requise pour la mise en place de l'IIoT ;
- **interopérabilité** : la grande variété des solutions existantes laisse les intégrateurs face à un nombre élevé de formats et de protocoles ; ces derniers peuvent être ouverts ou fermés, propriétaires ou libres, normalisés ou non et ne sont généralement conçus pour être interopérables.
- **contraintes réglementaires** : viennent perturber les règles du jeu et complexifier les choix technologiques (bandes de fréquences élevées, investissements régulés, etc) ;
- **sécurité et confidentialité** : Selon les résultats d'une enquête du forum économique mondial relatif à l'IIoT, 72% des personnes interrogées estiment que la problématique majeure de la sécurité est le principal obstacle à l'adoption de l'IIoT par les entreprises, en Amérique du Nord.

2. Intelligence artificielle

Le développement des machines, des capacités de calcul ainsi que des dispositifs utilisés pour produire et collecter des données en grandes quantités (ce que l'on appelle "Big data") a mis en évidence les besoins en machines automatiques et d'auto décision capables de participer à la résolution collaborative de problèmes, comme toute partie ou membre d'une équipe (qu'il ne s'agit pour autant de remplacer). Le concept d'intelligence artificielle (IA) est apparu au début des années 1960 comme une réponse possible à ce problème, lorsque des experts ont découvert comment créer des algorithmes basés sur des règles et des actions [RUS02][GOG93]. Cependant, ces algorithmes n'ont pas la capacité d'apprendre. Ils examinent certains paramètres principaux et appliquent les actions appropriées sur la base de configuration pré-identifiées par des humains. Entre les années 1970 et 1980, les experts ont amélioré ces algorithmes pour qu'ils puissent effectuer des raisonnements logiques selon les règles du "si-alors cela". Ces algorithmes, construits « à la main », ne tiennent pas compte de l'incertitude générée par l'environnement. Au début des années 1980, les experts ont rapidement été confrontés aux limitations des algorithmes d'IA de première génération, lorsqu'ils ont voulu traiter de nouvelles situations tenant compte de la variabilité des paramètres du monde réel, et plutôt que de se concentrer sur les paramètres et les règles, les experts ont commencé à se concentrer sur des paramètres et des règles. Ils ont alors

commencé à se concentrer sur les modèles statistiques et les réseaux neuronaux. L'un des projets importants ayant utilisé ces nouveaux paradigmes de l'intelligence artificielle est la reconnaissance vocale qui emploie de nombreux algorithmes, notamment le modèle de Markov caché et les modèles de mélange gaussiens. Malgré de meilleures performances par rapport à ceux de la précédente génération de l'IA, ces algorithmes n'étaient pas en mesure d'approcher les performances humaines, limités complexes calculs. Des nos jours, en tirant profit du haut niveau d'efficacité des ordinateurs et des appareils actuels, ces obstacles sont progressivement brisés, permettant l'essor de l'apprentissage en profondeur. Celui-ci peut être répartie en trois catégories selon la façon dont l'architecture et les techniques de l'apprentissage profond sont destinées à être utilisées [NAR20][HAL17][GUO11].

L'apprentissage non supervisé est à l'œuvre lorsqu'aucune classe cible n'est préétablie. Dans cette catégorie s'inscrivent les réseaux génératifs, capables de classer les caractéristiques apprises en classes auto-crées, et comprenant entre autres, les Deep Belief Networks, la machine Boltzmann et le codeur Deep. L'apprentissage supervisé, au contraire, apprend les caractéristiques et les classes à partir de classes préétablies. Les réseaux profonds correspondants sont aussi appelés réseaux profonds discriminatoires. Pour enfin, les réseaux hybrides profonds qui ne sont rien de plus que la combinaison des catégories précédentes.

3. Cobots

Le principe du cobot ou « robot collaboratif » consiste à intégrer des robots dans le process de fabrication en collaboration avec les employés. Le cobot, dont le nom est issu de « coopération » et « robotique », travail conjointement avec l'homme dans l'industrie, et n'ayant pas de vocation à le remplacer. Il s'agit d'une catégorie des robots autonomes dédiés à la gestion d'objets, en collaboration avec un opérateur humain, sous forme d'un process automatisés impliqués dans des relations cobotiques [ELZ19].

Les cobots sont généralement classés en trois catégories : les robots manipulés par un collaborateur situé à proximité (co-manipulation), les robots manipulés à distance et les systèmes assistant le corps humain dans son effort sous forme des structures électromécaniques. Ces catégorie cobots assistent l'homme dans son travail en lui assurant sécurité, la force, précision, la souplesse et confort, sans influencer son rôle de prise de décisions [TAO18].

4. Outils de simulations avancés

En 2019, le cabinet américain d'analyse Gartner a classé les jumeaux numériques (Digital Twin) parmi les tendances technologiques stratégiques. Le concept de jumeau numérique repose sur le développement d'une modélisation multi-physique d'un système complexe, prenant en compte l'intégration des objets réels pour un suivi en temps réel. Parmi les applications, citons les infrastructures de production (usine, réseau ferroviaire), les machines-outils, les systèmes robotisés ainsi que les composants complexes [TAO18][GRI17].

En général, le jumeau numérique englobe différents types d'outils et un développement sur des objectifs divers. Dans la littérature, il existe trois principaux types de jumeaux numériques à savoir :

- jumeau virtuel : catégorie de jumeau sans couplage avec la réalité (usine virtuelle ou machine virtuelle) ; permettant l'optimisation en amont du développement d'un sous-ensemble, ainsi que l'étude de différents scénarios d'utilisation ;

- jumeau numérique couplé : type de jumeau couplé à la réalité augmentée pour tester l'interaction de l'homme avec une machine ou une pièce de nature complexe ; il s'agit donc de mettre en œuvre un sous-ensemble virtuel et un processus virtuel.
- couplage de jumeau numérique et jumeau réel couplé : ce type de jumeau numérique porte le nom de « closed loop digital twins » ; il s'agit d'un couplage numérique de haut niveau, où les données issues des capteurs du jumeau réel sont une transmission temps réel au jumeau numérique capable de simuler le comportement et d'interagir en retour avec le jumeau réel pour en changer l'état si nécessaire.

Les jumeaux numériques représentent aujourd'hui un élément primordial pour le développement de l'industrie du futur. Ils permettent de délivrer des informations sur le comportement des machines, d'identifier le moment où un équipement risque de tomber en panne par l'intermédiaire de stratégies de maintenance préventive basée sur les données collectées, d'augmenter les gains de productivité et d'optimiser les processus.

5. Disponibilité de l'énergie : énergie propre

L'urbanisation intensive du monde a commencé à retenir l'attention des chercheurs, notamment en ce qui concerne les problématiques qui y sont liées. En 2014, plus de 54 % de la population mondiale vit dans des zones urbaines, et les statistiques estiment que ce pourcentage passera à 72 % d'ici les années 2050. En conséquence, la demande énergétique sous toutes ses formes augmente proportionnellement. Les pays disposant de sources d'énergie limitées ou importateurs de matières premières doivent être en mesure de répondre de manière intelligente à ces défis. D'où la notion émergente de ville intelligente qui commence à prendre tout son sens [MUK20][SAL19].

Le secteur de l'électricité a concentré les principaux efforts, en tant que source principale d'énergie consommée dans les zones urbaines. Cela incite les urbanistes à réorienter l'intelligence de la ville vers le concept de ville énergétique intelligente. La production d'électricité a connu plusieurs évolutions au cours des décennies, passant d'une production décentralisée à une production centralisée pour s'orienter vers une production distribuée avec intégration des énergies renouvelables. La mise en œuvre de sources d'énergie renouvelables a été considérée par les gouvernements comme une option alternative à la modernisation des centrales électriques traditionnelles. Ceci est dû à la disponibilité accrue des sources d'énergie renouvelables et aux avantages qu'elles représentent, dont entre autres, la rentabilité, l'inépuisable et l'émission réduite de gaz à effet de serre. [DIL20][ALT19]

6. Optimisation de la chaîne logistique

L'apparition de la logistique 4.0 dans le cadre de l'industrie 4.0, a assuré l'optimisation de la chaîne d'approvisionnement. Cette notion est fondée sur la numérisation des processus, se basant sur les progrès technologiques du Big data et de l'internet des objets. Les retombées de la logistique 4.0 sont une augmentation de l'efficacité et de la rapidité des processus ainsi qu'une minimisation des pertes [ISM19][ZAN19][YAN20][RUO19].

Pour une meilleure implémentation de la logistique 4.0, 5 défis sont à relever, à savoir :

- réduire les délais de la production et de livraison ;

- développer une logistique intelligente basé sur l'automatisation des processus des entrepôt ;
- intégrer une stratégie omnicanale au niveau du service client ;
- prédire les besoins du client sur la base du Big data ;
- gérer à distance la traçabilité des produits sur toute la chaîne d'approvisionnement.

VI. Conclusion

Dans cette partie du manuscrit ont été présentés les différents aspects du thème principal que j'ai mis en place, au sein de l'équipe PRI, concernant l'industrie du futur. Cette révolution surgit d'une part pour moderniser les outils de l'industrie par la montée en puissance des nouvelles technologies et d'autre part, pour améliorer de la chaîne de valeur d'un pays. Les différentes révolutions industrielles ont été présentées dans cette partie, en s'inspirant du modèle allemands industrie 4.0. Les avancées technologiques participant à la mise en place de cette industrie ont également été présentés. La suite de ce rapport présente ma contribution ce qui concerne le développement des applications pour l'industrie du futur. La partie 2, qui suit, traite des aspects liés à la communication en le milieu industriel. L'analyse intelligente des données est discutée au niveau de la partie 3. Enfin, la gestion des énergies propres est couverte dans la partie 4.

Partie 2 Système de communication industriel sans-fil

Chapitre 2.1 : Conception architecturale

I. Introduction

Durant ces dernières années, les développements technologiques des systèmes de communication sans fil ont amélioré les besoins des utilisateurs en termes d'accessibilité, de quantité des données, d'intelligence en prise de décision et de consommation d'énergie. Ces technologies sont toujours en évolution, et ceci grâce à l'intégration de nouvelles techniques permettant d'améliorer la connectivité des milliards d'objets. Ces objets, capteurs ou actionneurs, connectés sont par nature des équipements physiques autonomes, dotés d'une source énergétique limitée. Ils sont capables de communiquer entre eux, créant ainsi une révolution technologique. Cette révolution apporte des innovations plus ambitieuses dans des domaines d'application diverses : la médecine, l'industrie, l'énergie, la sécurité et autres.

Pour les applications industrielles, les travaux de recherche s'orientent plus particulièrement vers la création d'usines connectées, robotisées et intelligentes afin d'améliorer les systèmes de production actuel. Cette interconnexion des usines est assurée via les systèmes connectés, dans lesquelles les employés, les machines et les produits collaborent les uns avec les autres pour former la nouvelle révolution. Au cœur de cette révolution, l'industriel internet des objets (IIoT) joue un rôle primordial du développement de la connectivité pour cette révolution. L'IIoT se base sur l'utilisation des capteurs ou actionneurs connectés ayant pour objectif d'améliorer les processus industriels ainsi que la fabrication. Il intègre l'intelligence dans le traitement et l'analyse des données afin d'assurer une meilleure communication M2M (Machine-To-Machine). Ce qui existe depuis l'intégration de l'électronique dans le secteur industriel lors de la troisième révolution « industrie 3.0 ». Il est aujourd'hui nécessaire de développer des architectures de communication robuste permettant aux objets, dans un milieu industriel fortement bruité, de communiquer facilement afin de monter une information fiable pour une meilleure prise de décision. Dans un tel environnement industriel, la propagation se distingue par rapport aux autres moyens de communication antérieurs conventionnels, et ceci à travers ses grandes dimensions et la nature des objets et des obstacles à l'intérieur. Ainsi, l'environnement industriel peut être modélisé comme un canal à évanouissement affecté par un bruit impulsif et gaussien.

Compte tenu de l'avantage majeur de la connectivité dans l'environnement industriel, il est nécessaire de proposer des architectures de communication sans-fil, robustes et efficaces à l'intérieur de l'usine. La conception de ces systèmes diffère pour chaque application, en tenant compte des contraintes de milieu de propagation. Contrairement aux autres environnements intérieurs traditionnels comme les bâtiments résidentiels ou les bureaux, cet environnement se caractérise par ses grandes dimensions et aussi par la nature de ses éléments et de ses obstacles. La complexité du contexte industriel ainsi que le bruit présent dans l'environnement de propagation poussent à offrir un système de communication sans fil robuste pour faire face aux diverses perturbations lors de la transmission [CHE16].

Le travail couvert par ce chapitre a fait l'objet de deux thèses (S.Saadaoui et A.Khalil), et a donné lieu à plusieurs publications [SAA201, SAA202, SAA19, SAA181, SAA182, SAA183, SAA184, SAA17, SAA15]. Nous nous intéressons au développement des architectures dans un environnement industriel fortement bruité. Dans ces travaux, un système de communication sans fil multi-utilisateurs est proposé, caractérisé par deux modes de fonctionnement distincts. Le premier mode assure une communication de

type "Many-to-One" (MtO), entre plusieurs émetteurs et un seul récepteur. Le deuxième mode permet à un émetteur d'envoyer à plusieurs récepteurs en mode One-to-Many (OtM). Ces modes de communication illustrent les liens entre les trois premiers niveaux de la pyramide CIM (Computer-Integrated Manufacturing). Cette pyramide illustre le modèle industriel sur 5 niveaux. L'architecture de communication proposée est basée sur la transformation de paquets d'ondelettes dont l'échelle d'analyse contrôle le nombre d'entrées/sorties, et par ailleurs contrôle le nombre des capteurs constituant ainsi l'architecture de communication. Un choix optimal de l'ondelette en termes de taux d'erreur binaire est fait pour réaliser les simulations dans un canal industriel. Un modèle de ce canal est développé afin de simuler les performances de l'architecture de communication dans un environnement très proche de l'industrie. Naturellement, l'optimisation des systèmes de communication est assurée par les codes correcteurs d'erreurs, c'est ainsi que nous avons procédé. Nous avons optimisé les performances de l'architecture de notre système à travers du codage canal conventionnel et puis une étude comparative des performances avec l'OFDM.

II. Système de communication industriel

Après la troisième révolution industrielle, et grâce au déploiement des réseaux et protocoles de communication, les systèmes industriels communicants ont fait une évolution remarquable. Ces systèmes, qui sont passés d'une communication câblée à une communication sans fil, ont facilité l'accès à une grande quantité de données pour une prise de décision rapide et efficace. Cependant, la communication dans un environnement industriel a assuré l'interconnexion des systèmes automatisés par le biais de différents modes et réseaux locaux [SAU10]. Donc, les systèmes automatisés ont très fortement progressé avec l'arrivée des nouvelles technologies de l'information et de la communication (TIC), ce qui a permis de réduire considérablement le câblage coûteux dans l'industrie. Dans cette optique, il était nécessaire de prendre en compte la même topologie des systèmes d'automatisation pour faciliter l'intégration des systèmes de communication fiable. Les fabricants de produits d'automatisation ont investi davantage sur les réseaux et les bus de terrain [SAU10].

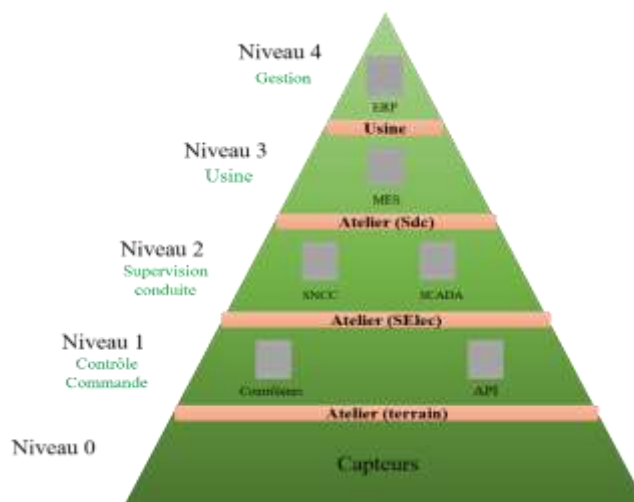


Figure 6 Pyramide de CIM

Les technologies de communication ont été caractérisées par l'apparition du modèle CIM classique (figure 6) qui a pu organiser les fonctions et les rôles autour d'un système hiérarchique. Cependant, la pyramide de CIM permet de décrire l'organisation des différents systèmes dans l'industrie selon une division verticale de cinq niveaux hiérarchiques. Les fabricants des systèmes de communication adaptent les performances de leurs réseaux en fonction des niveaux CIM sur lesquels ils fonctionnent. Ensuite, plusieurs protocoles de communication sont mis en place pour relier les différents niveaux de la pyramide CIM, en incluant des standards dans les systèmes de communication industrielle telle

qu'Ethernet et TCP/IP. Au niveau de l'instrumentation (niveau 0) incluant les capteurs/actionneurs, des technologies filaires et sans fil sont utilisées pour connecter les différents capteurs entre eux. Les normes de communication sans fil appliquées dans les environnements industriels reposent sur deux éléments nécessaires à savoir : la portée et la nature de l'équipement utilisé. Pour les réseaux personnels sans fil WPAN à faible portée, des technologies telles que le Bluetooth, WirelessHART, LoRa et ZigBee sont déployées [AND12]. Donc, les réseaux locaux sans fil WLAN utilisent la norme IEEE 802.11 communément appelée Wi-Fi, et le réseau longue portée WWAN déploie des réseaux cellulaires LPWAN et des réseaux longue distance à faible puissance.

La communication dans le secteur industriel est caractérisée depuis des années par une nouvelle tendance consistant à intégrer le concept sans fils à travers les systèmes cyber-physiques (CPS). Cette émergence, connue sous le nom de l'usine connectée ou « Smart Factory », est basée sur la convergence entre les métiers de l'industrie et les applications numériques pour créer un système de fabrication intelligent. Cela assurera une grande adaptabilité de la production et un apport plus efficace des ressources [WOL17]. Il faut noter que la donnée constitue l'élément clé du développement de l'écosystème IIoT. Elle provienne de différents objets, et facilitent aux utilisateurs l'accès à l'information utile en temps réel, à tout moment et à distance. Grâce au concept de l'intelligence embarquée et connectée, l'IIoT consiste à identifier et à établir la communication entre tous les éléments (machines, produits en cours, employés, fournisseurs, clients, infrastructure, etc.), qui peuvent être caractérisés comme étant un objet connecté [SAS15]. Ces objets connectés industriels échangent des quantités importantes de données qui sont ensuite transférées pour la supervision ou le stockage et le traitement.

Grâce à l'IIoT, l'utilisateur peut agir en temps réel et d'une manière numérique sur son environnement industriel, pour optimiser plusieurs processus telles que l'amélioration de la production, le contrôle des machines, ou l'optimisation des chaînes d'approvisionnement en temps réel. Il existe de nombreuses technologies de connectivité sans fil pour les objets. Le choix de la stratégie de connectivité se fait en fonction de plusieurs critères et repose sur le choix du capteur. Ceci dépend principalement de l'emplacement (intérieur, extérieur, ...), de la mobilité, de la consommation d'énergie, de la quantité de données, de la fréquence d'envoi et de la sécurité. Il est nécessaire de considérer l'utilisation simplifiée des transmissions liées aux objets connectés et la sécurité des utilisateurs et des données transmises. Cela sera possible lorsque la qualité de la liaison radio utilisée pour transmettre les données sera fiable.

III. La théorie de la transformée en ondelette

Le défi majeur de déploiement d'un système de communication sans fils en milieu industriel est la dureté de cet environnement, qui nécessite l'adaptation des niveaux de communication. Étant donné les ressources limitées de ces systèmes de communication, que ce soit en termes de puissance de calcul, de consommation d'énergie, de taille ou de connectivité, des techniques appropriées de modulation numérique et de codage de l'information doivent être utilisées pour améliorer les communications pour les réseaux industriels de capteurs sans fil [SAL18]. Dans la littérature, un grand nombre des travaux autour des couches physiques pour les systèmes de communication sans-fil ont été proposées pour répondre à leurs contraintes. Les premières techniques de modulation à exploiter sont les modulations à bande étroite, dérivées des modulations analogiques. Par la suite, d'autres modulations multi-porteuses basées sur l'étalement de spectre ou modulation impulsionnelle ont été proposées. Dans ce contexte, les modulations impulsionnelles permettent d'augmenter le débit binaire transmis au détriment de la complexité de l'émetteur et du récepteur en rapport avec le nombre des impulsions générées. Une autre alternative à toutes ces techniques est la modulation par impulsions basée sur la transformée en ondelettes pour augmenter le débit, et surtout pour bénéficier de la simplicité de génération des

différentes formes d'impulsions par les émetteurs, et dans la conception du récepteur capable de détecter les différentes formes d'ondes reçues.

Dans la théorie de la transformation en ondelettes (WT), les fonctions de base des ondelettes sont obtenues à partir de la fonction mère appelée "ondelette" par translation et dilatation ou contraction, représentée par l'équation suivante :

$$\Psi_{s,\tau}(t) = \frac{1}{\sqrt{s}} * \Psi\left(\frac{t-\tau}{s}\right), \quad (1)$$

Où $s \in \mathbb{R}^*$ et $\tau \in \mathbb{R}$. Pour les grands s , la fonction de base devient une version étirée de l'ondelette mère, c'est-à-dire une fonction basse fréquence, tandis que pour les petits s , la fonction de base devient une ondelette contractée, c'est-à-dire une fonction haute fréquence. Les ondelettes discrètes transformées (DWT) sont discrètement extensibles et traduisibles. Cela a été réalisé en modifiant la représentation des ondelettes pour créer Daubechies en 1992 [DAU92] :

$$\Psi_{j,k}(t) = \frac{1}{\sqrt{s_0^j}} * \Psi\left(\frac{t-k s_0^j \tau_0}{s_0^j}\right), \quad (2)$$

Nous choisissons généralement $s_0 = 2$ pour que l'échantillonnage de l'axe des fréquences corresponde à un échantillonnage dyadique. En outre, $\tau_0 = 1$ donne un échantillonnage dyadique dans le temps. En discrétisant les paramètres de translation et de contraction de la dilatation de l'ondelette dans (1), on obtient la WT dyadique discrète de $x(t)$:

$$X(j, k) = 2^{-\frac{j}{2}} \int_{-\infty}^{+\infty} x(t) \Psi^*(2^{-j}t - k) dt, \quad (3)$$

Avec $j, k \in \mathbb{Z}$.

Il est nécessaire de mentionner que les transformées en ondelettes peuvent être mis en œuvre sous forme de banques de filtres non uniformes formées à la fois de coefficients lisses et d'ondelettes. Les coefficients lisses sont séparés en un filtre numérique passe-bas H et un filtre passe-haut G . En utilisant la fonction de mise à l'échelle et l'ondelette mère correspondante, nous obtenons les deux filtres numériques H et G . Nous supposons que H et G , comme un filtre FIR non récursif de longueur L , les fonctions de transfert de H et G peuvent être représentées comme suit :

$$H(Z) = h_0 + h_1 z^{-1} + h_2 z^{-2} + \dots + h_{L-1} z^{-(L-1)} \quad (4)$$

$$G(Z) = g_0 + g_1 z^{-1} + g_2 z^{-2} + \dots + g_{L-1} z^{-(L-1)} \quad (5)$$

L'algorithme de l'arbre de Mallats ou algorithme de la pyramide [MAL89] est utilisé comme solution de décomposition multi-résolution du DWPT, les deux relations d'échelle (4) et (5) conduisent à des fonctions d'échelle et d'ondelettes similaires à celles des ondelettes scalaires. Mais les équations sont des équations matricielles à deux échelles et peuvent être données par :

$$\Phi(t) = \sum_n h(n) \Phi(2t - n) \quad (6)$$

$$\Psi(t) = \sum_n h(n) \Psi(2t - n) \quad (7)$$

Avec $\Phi(t) = [\Phi_1(t) \Phi_2(t) \dots \Phi_r(t)]^T$ et $\Psi(t) = [\Psi_1(t) \Psi_2(t) \dots \Psi_r(t)]^T$ forment l'ensemble des fonctions de mise à l'échelle et les ondelettes correspondantes. Le suffixe r indique le nombre d'ondelettes et est appelé multiplicité.

La transformation des paquets d'ondelettes servira de base de modulation pour notre système architecturale. Cette architecture est présentée dans la figure 2 avec une profondeur de 3, permettant à $2^3 = 8$ entrées de données différentes $[x_0, x_1 \dots, x_7]$ d'être modulées par IDWPT. Ces données seront récupérées, après passage par un canal de transmission, au niveau du récepteur par une transformation DWPT afin de reconstruire les données $[y_0, y_1 \dots, y_7]$.

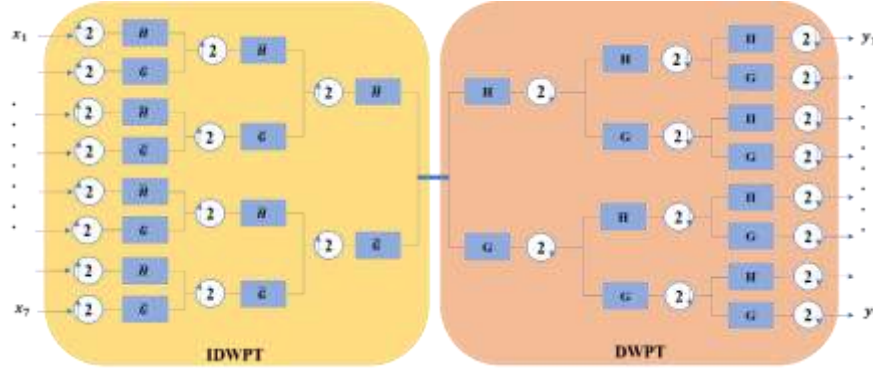


Figure 7 Emetteur à base IDWPT et récepteur à base de DWPT

IV. Système architecturale à base de DWPT

1. Architecture à base de DWPT

L'architecture de communication proposée est basée sur IDWPT à l'émission (mis en œuvre comme banques de filtres de synthèse) et à DWPT à la réception (mis en œuvre comme banques de filtres d'analyse) avec des contraintes diverses liées à l'environnement de propagation. Donc, il est primordial de valider la robustesse des différents aspects architecturaux qui dépendent des applications prévues. Pour l'ensemble des modes de fonctionnement, l'échelle d'analyse fournit des informations sur le nombre d'utilisateurs possibles. L'activation ou non d'une ou plusieurs entrées génère une forme d'impulsion orthogonale spécifique. L'entrée de chaque filtre au niveau de l'émetteur contient soit un bit, soit une trame de bit, de sorte que les entrées peuvent être activées ou non. Ces données peuvent différer d'une entrée à l'autre et seront modulées en impulsions. Une étude sur les différents types de modulations binaires et/ou d'impulsions a été présentée dans [TAB16] et a permis de faire un choix approprié du type d'impulsion à utiliser pour une architecture multi-résolution.

2. Fonctionnement

Dans l'ensemble des travaux des thèses autour de cet axe de communication industrielle, deux modes de fonctionnement multi-utilisateurs ont été étudiés et testés à savoir : le mode "Many-to-One" (MtO) et le mode "One-to-Many" (OtM). Le choix de ces modes dépend essentiellement de l'existence dans les architectures de communication actuelles (maître-esclave, bidirectionnel), afin de faciliter l'adaptation pour une meilleure intégration.

A. Mode Many-To-One

Le mode MtO correspond à une communication multi-capteurs de plusieurs capteurs vers un seul récepteur (figure 8). Chaque capteur émetteur est sous forme d'un bloc IDWPT assurant l'activation d'une entrée unique pour cet émetteur ce qui permet d'identifier déjà le capteur émetteur. Donc, chaque entrée du bloc IDWPT à l'émission correspond à une seule sortie du bloc DWPT à la réception (figure 4).

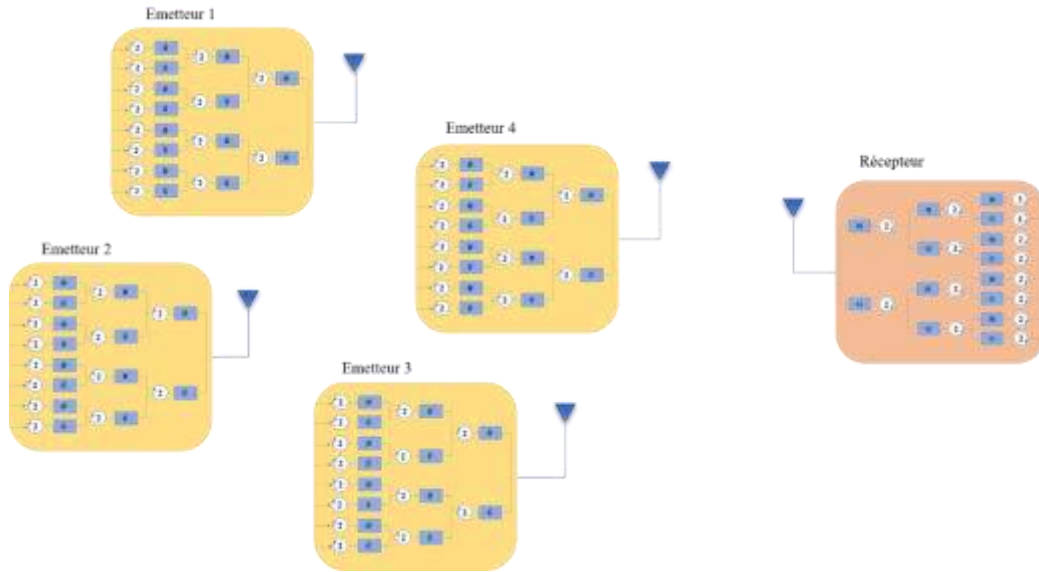


Figure 8 Mode Many-to-One

En se basant sur la pyramide du CIM, ce mode de communication correspond à une communication du niveau 0 et 1 au niveau 2. Dans ce mode, les données issues d'un ou plusieurs capteurs à faible débit sont transmises en même temps au même récepteur, et l'activation d'une des entrées génère l'activation d'un utilisateur. La figure 9 illustre une architecture à 8 entrées correspondant à 8 capteurs potentiels (échelle 3). Donc, chaque émetteur utilise une seule entrée qui est différente des autres entrées. La forme d'impulsion de chaque entrée activée est différente des formes d'onde des autres entrées, les autres entrées non activées seront mises à zéro.

Le récepteur à base de DWPT reçoit en même temps le flux de données de tous les émetteurs. Cependant, chaque capteur est identifié par une sortie de filtre unique à la réception qui représente la même entrée au niveau du récepteur. Ce mode a une occupation de bande passante plus élevée que le mode utilisateur unique car chaque utilisateur (entrée activée) occupera une sous-bande séparée. Cela entraînera une sélectivité de fréquence du canal en raison des interférences entre les utilisateurs, pour lesquels il sera nécessaire de protéger autant que possible les données transmises. Néanmoins, cela permettra une communication synchrone de plusieurs capteurs vers le même récepteur.

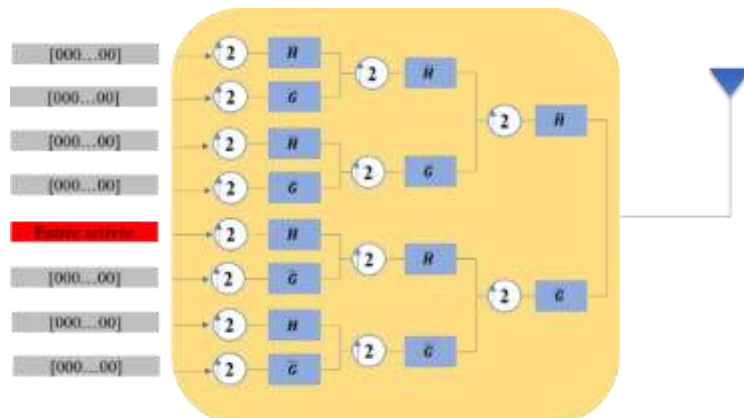


Figure 9 Fonctionnement de l'émetteur en mode MtO

B. Mode One-to-Many

Pour le mode OtM, un émetteur IDWPT est caractérisé par n entrées, capable d'envoyer l'information à m récepteurs DWPT à n sorties chacun.

Il faut noter que les informations envoyées via de l'entrée (i) sont récupérées à la sortie (i). Il s'agit du mode inverse du mode MtO où les équipements des niveaux 1 et 2 de la pyramide CIM envoient les mêmes informations aux capteurs de niveau (figure 12). Ce mode est équivalent à l'architecture maître-esclave dans un système de communication industriel classique. Bien que le débit des données transmises soit généralement faible, la réception d'informations provenant de plusieurs capteurs crée une diversité spatiale qui permet la récupération des données par au moins un seul récepteur. La figure 10 illustre la transmission des données d'un seul capteur vers 4 récepteurs. Les données envoyées seront détectées dans la 7^{ème} sortie des 5 récepteurs, comme le montre la figure 11.

I. Caractéristiques du canal industriel

Les signaux dans un milieu industriel sont soumis à plusieurs perturbations dues à des phénomènes de propagation. Ces perturbations dégradent, d'une manière significative, les performances du système. Cet environnement est affecté par des bruits et des interférences très complexes, causées par la température des machines, les vibrations, les structures métalliques et les machines lourdes [SHA09]. En plus de ça, le signal subit des effets d'atténuation et d'ombrage causés par des obstructions dans le canal de propagation. La mobilité des équipements et des personnes dans l'environnement sans fil, peut également engendrer des effets variables dans le temps. Ces effets peuvent détruire significativement les informations échangées et donc dégrader toutes performances d'un système de communication dans l'industrie [CHE16]. Donc, il est nécessaire d'estimer le canal de propagation afin de concevoir et évaluer tout le système de transmission sans-fil pour les applications industrielles.

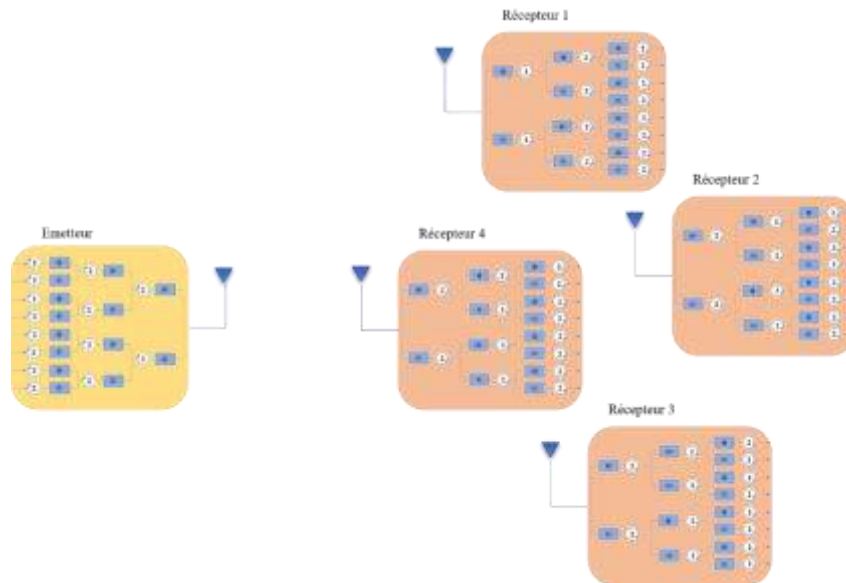


Figure 10 Mode One-to-Many

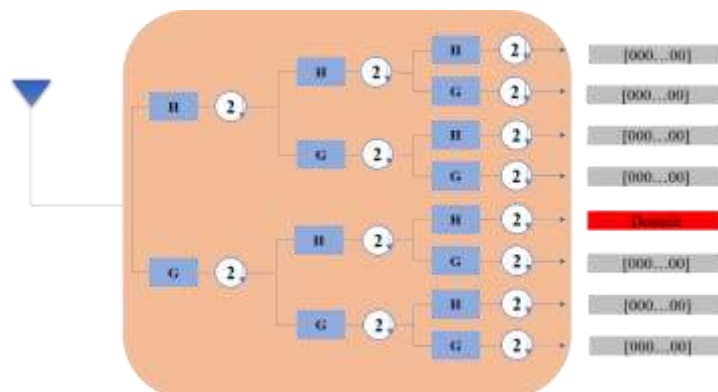


Figure 11 Receiver in One-to-Many mode



Figure 12 Fonctionnement des modes OtM et MtO dans CIM

1. Fadings

Pour la propagation sans fil dans un contexte industriel, l'information reçue est soumise à des effets d'atténuation et d'évanouissement, dont l'expression du signal reçu est :

$$y(t) = h(t) * s(t) + n(t), \quad (8)$$

Où, $h(t)$ présente la réponse impulsionnelle du canal, $s(t)$ est le signal transmis et $n(t)$ est le bruit additif.

Dans une usine, les capteurs/actionneurs sont généralement disposés suivant la configuration de système de production. Des mesures de canaux intérieurs à bande étroite et à large bande ont été effectuées à travers travaux de recherche dans plusieurs environnements industriels [SEX05, LUO11], et ils ont montré que la réponse impulsionnelle temporelle $h(t)$ à un endroit fixe dans un contexte industriel suit une distribution exponentielle réduite [CHE16]. Cette distribution dépend principalement des délais et de la puissance de chaque voie, ce qu'est montré dans le modèle de Saleh Valenzuela [SAL87]. L'étalement des retards des canaux peut être déterminé à partir de la réponse impulsionnelle en fonction de la fréquence de transmission et des configurations LOS (Line-Of-Sight) ou NLOS (Non-Line-Of-Sight). Donc, l'objectif consiste à valider l'architecture à base de IDWPT/DWPT sous un canal industriel simulé, nous avons alors généré une réponse impulsionnelle du canal basée sur les mesures à partir des travaux [CHE16, KAR07] pour les deux configurations LOS et NLOS à 2,4 GHz. La réponse impulsionnelle simulée comprend 10 chemins significatifs (figure 13).

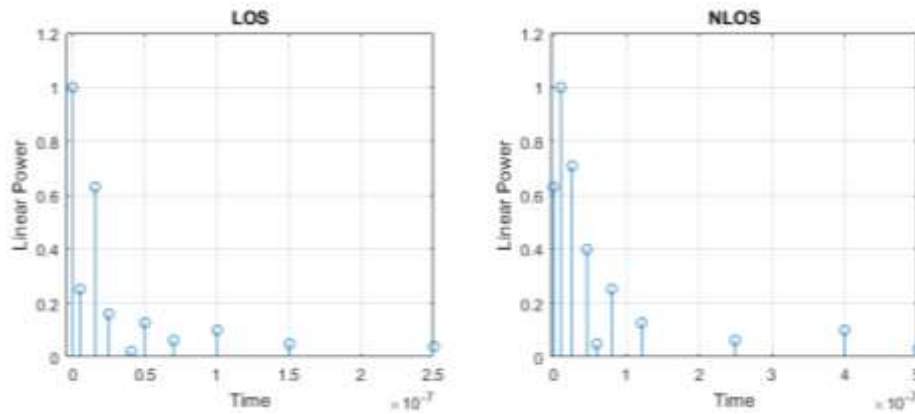


Figure 13 Réponse impulsionnelle du canal simulé

Afin de représenter un phénomène d'évanouissement, l'ensemble des chemins suivent la même distribution statistique [CHE16]. L'enveloppe temporelle du signal reçu suit la distribution statistique de *Rice* dans le scénario LOS et la distribution de *Rayleigh* dans le cas NLOS.

$$P(x) = \frac{x}{\sigma^2} \exp\left(-\frac{x^2 + K^2}{2\sigma^2}\right) I_0\left(\frac{Kx}{\sigma^2}\right), \quad (9)$$

Avec $I_0(x)$ la fonction de Bessel modifiée à l'ordre zéro. K est le paramètre de forme appelé facteur de *Rice*. Pour $K=0$, $P(x)$ converge vers la distribution de *Rayleigh*.

2. Bruit

Naturellement, dans le cas des systèmes communications sans fil, le bruit ajouté au signal reçu est le bruit blanc gaussien (WGN additif). Dans un environnement industriel, les signaux seront affectés par le bruit, qui est représenté un bruit impulsif provenant des moteurs, des régulateurs, des équipements électriques et autres. Cependant, le bruit industriel $n(t)$ de l'équation (8) sera modélisé comme une superposition du bruit blanc gaussien AWGN $w(t)$ et du bruit impulsif $i(t)$ ayant une très forte variance suivant l'équation 9. Alors, $i(t)$ est modélisé comme un processus de Markov du premier ordre à deux états décrivant ainsi le bruit impulsif typique [CHE12, HU14].

$$n(t) = w(t) + i(t), \quad (10)$$

Où $w(t)$ et $i(t)$ sont des processus gaussiens de moyenne zéro dont les fonctions de densité de probabilité sont respectivement :

$$P[w(t)] = \frac{1}{\sqrt{2\pi\sigma^2}} \exp\left[-\frac{w(t)^2}{2\sigma^2}\right], \quad (11)$$

$$P[i(t)] = \frac{1}{\sqrt{2\pi R\sigma^2}} \exp\left[-\frac{i(t)^2}{2R\sigma^2}\right], \quad (12)$$

Avec $R \geq 1$ est une constante d'échelle de l'amplitude du bruit impulsif. Plus cette amplitude est élevée, plus le bruit est important. Pour nos simulations, nous utilisons $R=50$ qui correspond à un bruit impulsif significatif.

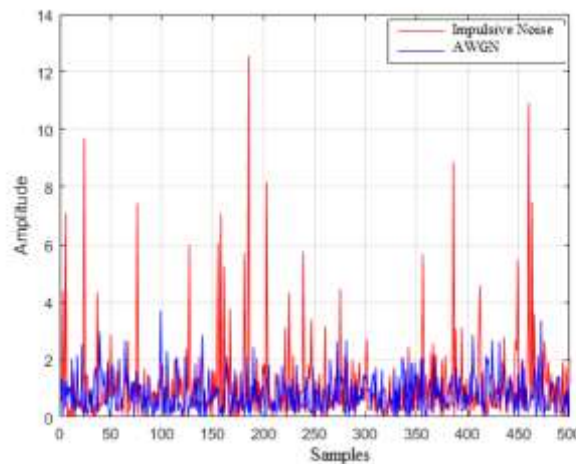


Figure 14 Bruit industriel avec un facteur d'échelle $R=50$

II. Discussions et résultats

Nous présenterons dans ce passage, les résultats de simulation de l'architecture IDWPT/DWPT sous un canal industriel bruité. Toutes les simulations sont réalisées sous MATLAB. Le tableau 1 présente les différents paramètres permettant de définir le contexte de l'étude.

1. Simulations sous canal AWGN et industriel

Le système proposé est basé sur une architecture multi-utilisateur IDWPT/DWPT pour 2^n capteurs/actionneurs dans un environnement industriel. Les émetteurs sont basés sur l'implémentation IDWPT sous forme de bancs de filtres de synthèse, et les récepteurs sont basés sur des DWPT implémentés comme des bancs de filtres d'analyse [TAB16, SAA15]. Le canal industriel est décrit comme un canal à évanouissement de *Rice* dans le cas de configuration LOS et un canal à évanouissement de *Rayleigh* pour la configuration NLOS à la fréquence de 2,4GHz affecté par un bruit impulsif. Nous choisissons dans nos simulations l'ondelette « Symlet » qui a démontré un taux d'erreur binaire le plus bas pour l'architecture IDWPT/DWPT sous un canal AWGN.

Paramètres	Description
Communication	MtO and OtM
Applications	Large bande
Fréquence	2.4GHz
Nombre des capteurs	4 – 16 – 32
Modulation	Impulsionnel
Émission	IDWPT
Réception	DWPT
Ondelette	Symlet
Transmission configurations	LOS & NLOS
Nombre de trajets	10 trajets

Tableau 1 Les paramètres du système

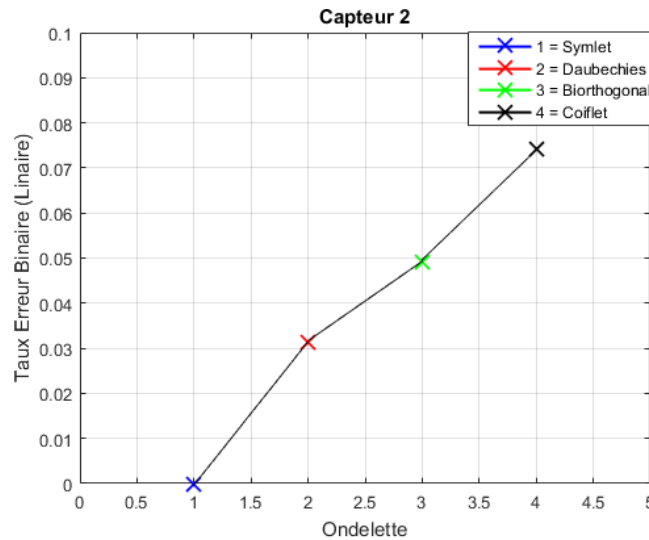


Figure 15 Performances de quatre ondelettes

Dans le cas du mode MtO en configuration multi-capteur, les trames pour chaque utilisateur sont de longueur de 16 bits générés aléatoirement. Cette configuration des données est due au fait que les capteurs en milieu industriel transmettent de courts paquets de données. Ces trames de données sont modulées à base d'une modulation impulsionnelle et chaque émetteur est identifié par un signal unique. Les données sont modulées à travers une modulation impulsionnelle à l'aide d'une impulsion "Symlet" (figure 15).

Basant sur l'effet de l'évanouissement du canal dû à la propagation du retard en plus du bruit AWGN pour les configurations LOS et NLOS, il est clair que l'effet des trajets multiples perturbe les signaux des différents utilisateurs et provoque ainsi des interférences entre eux. L'architecture proposée permet la détection du signal à la réception pour tous les utilisateurs comme le montre la figure 16 pour un SNR (Signal to Noise Ratio) supérieur à 20dB [OH14, HAK18]. Avec les effets d'évanouissement, et l'ajout du bruit industriel composé de bruit gaussien et de bruit impulsionnel, le taux d'erreur binaire est présenté dans la figure 17. L'architecture de communication converge plus lentement et les performances diminuent, mais elle permet d'avoir entièrement les informations d'un SNR jusqu'à 35dB. Dans le cas d'un bruit industriel, la donnée peut être complètement perdue si les effets du canal ne sont pas correctement pris en compte.

Dans le cas du mode OtM, un seul émetteur est basé sur le DWPT avec n entrées envoie les données à m récepteurs basés sur le DWPT avec n sorties chacun. Le principe de ce mode est d'activer une seule entrée (i) de l'émetteur et de forcer les autres à zéro. Lors de la réception, les données seront détectées à la sortie (i) de chaque récepteur.

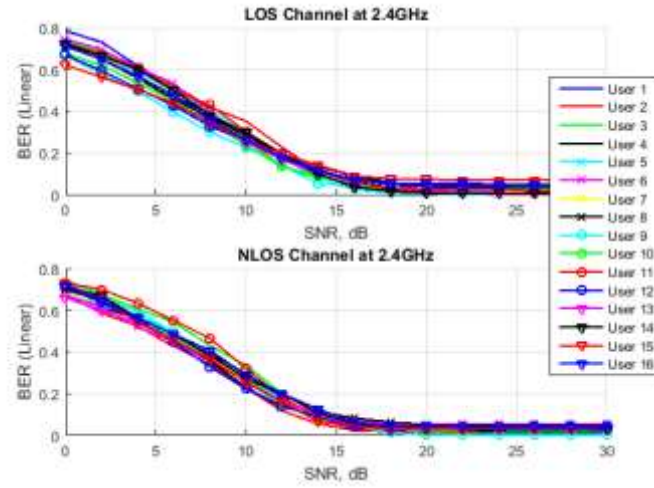


Figure 16 BER/SNR sur un canal à évanouissement avec bruit AWGN pour le mode MtO

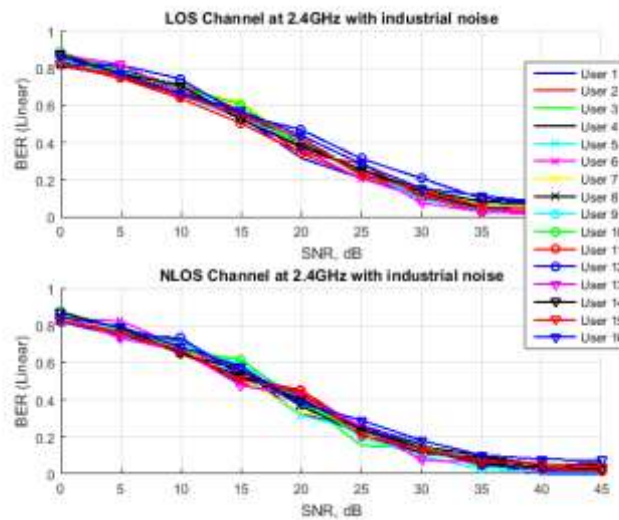


Figure 17 BER/SNR sur un canal à évanouissement avec bruit industriel pour le mode MtO

En se basant sur le canal d'évanouissement et le bruit AWGN pour les configurations LOS et NLOS, l'architecture détecte le signal à la réception. Selon les résultats de simulation présentés à la figure 18, le signal émis est détecté au niveau des capteurs de réception pour les canaux LOS et NLOS à 2,4 GHz. La détection se fait pratiquement sans erreur au-dessus de 20dB. Certaines différences entre les configurations LOS et NLOS sont détectées à partir d'un SNR de 14dB. Ceci est principalement dû aux effets de l'évanouissement et de la dispersion des canaux qui doivent être corrigés en utilisant le codage des canaux pendant la transmission. Prenant en compte l'effet du bruit industriel, l'architecture de communication permet de détecter entièrement les informations d'un SNR de 30dB comme le montre la figure 19. La différence de taux d'erreur est très importante et dépend du canal de propagation.

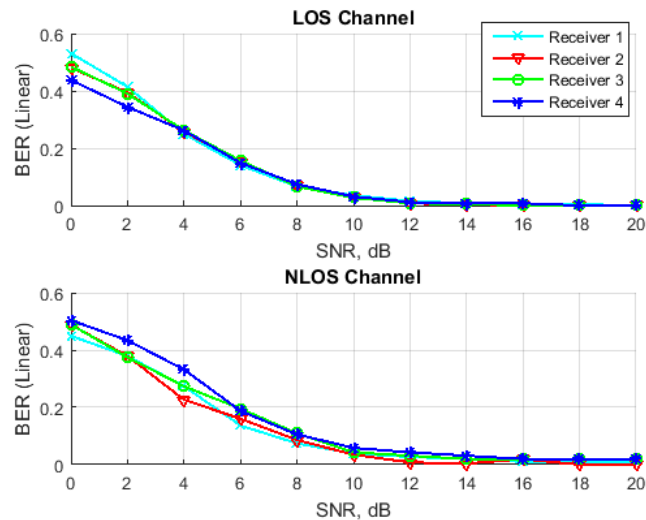


Figure 18 BER/SNR sur un canal à évanouissement à 2,4 GHz avec bruit AWGN pour le mode OtM

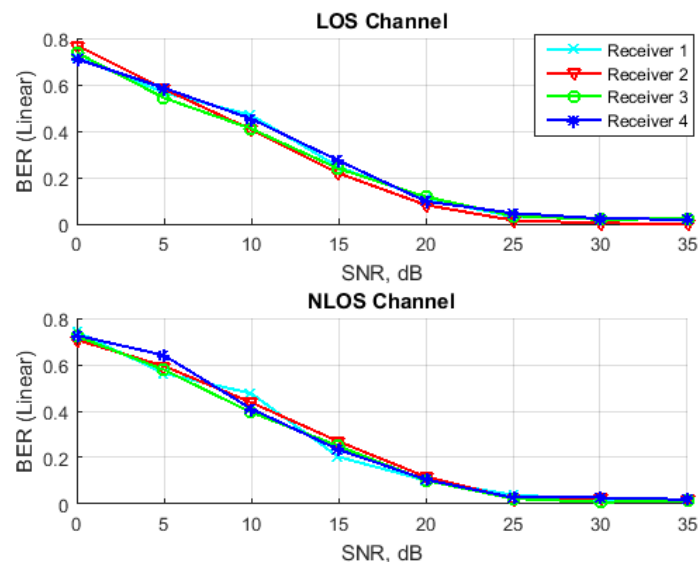


Figure 19 BER/SNR sur un canal à évanouissement avec un bruit industriel pour le mode OtM

2. Performances : Code correcteur d'erreurs

Pour améliorer la fiabilité de l'architecture par rapport au canal industriel à évanouissement, nous proposons d'ajouter un code de canal correcteur d'erreurs du côté de l'émetteur (figure 20). Nous utilisons deux techniques de codage : un code convolutif et les codes RS (Reed Solomon). Pour le code convolutif,

nous choisissons un codeur utilisant un diagramme en treillis avec une matrice polynomiale génératrice de [171 133] ayant une longueur de contrainte de 7 et un taux de codage = 1/2. Du côté du récepteur, nous utilisons un décodeur de Viterbi [LI12, SCH09].

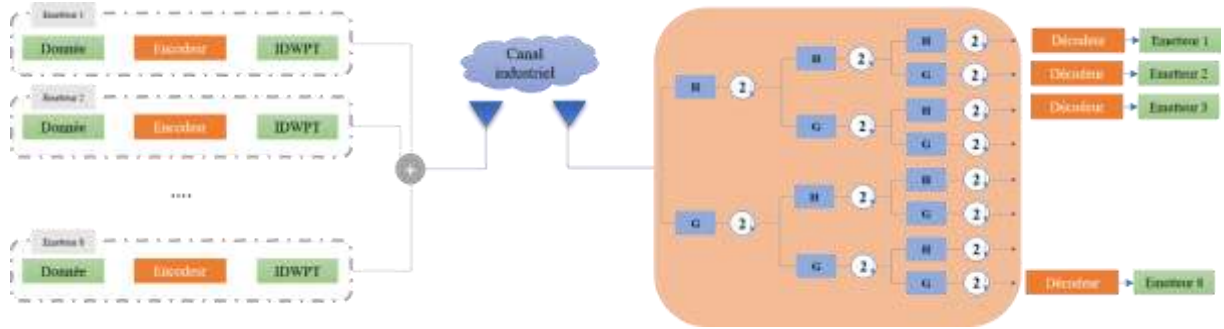
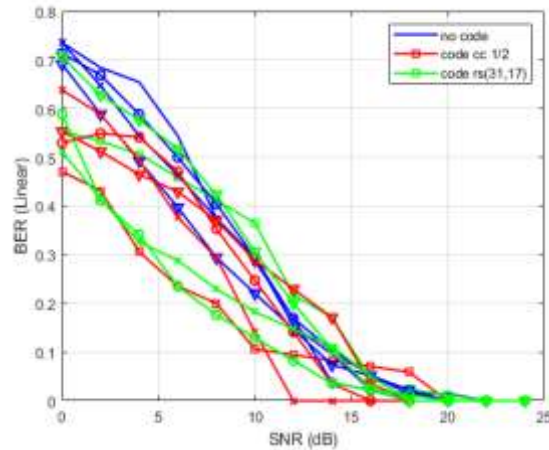


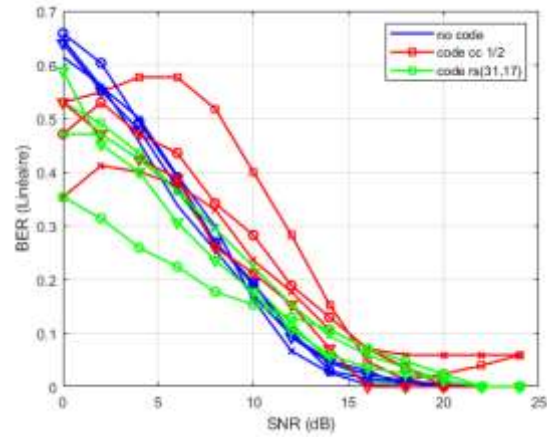
Figure 20 Architecture pour 16 8 capteurs avec le codage canal

Quant au codeur Reed Solomon, nous utilisons un RS (31,17) avec 31 symboles de mot de code et 17 symboles de message basés sur la longueur des données transmises. Ces codes sont les plus adaptés aux réseaux de capteurs sans fil [KHA19].

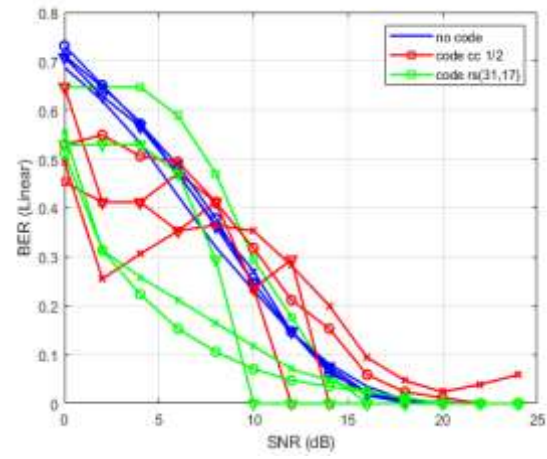
Comme l'illustre la figure 21 pour une architecture à 8, 16 et 32 utilisateurs sur un canal industriel à évanouissement avec bruit AWG, le code de correction d'erreur améliore la robustesse de l'architecture contre l'évanouissement du canal en fonction du nombre de capteurs utilisés. Pour une meilleure représentation graphique, nous avons montré les résultats de seulement 4 utilisateurs dans chaque cas ; pour 8 utilisateurs (utilisateur 1, 3, 5 et 7), pour 16 utilisateurs (utilisateur 1, 6, 12, 16) et pour 32 utilisateurs (utilisateur 1, 12, 22 et 30). Pour un canal à évanouissement avec bruit AWG, le rapport signal/bruit SNR est réduit de 2 dB en utilisant à la fois un code convolutionnel et un code RS pour une architecture à 8 utilisateurs (ou capteurs), et de 4 dB pour un code RS dans le cas d'une utilisation à 32 utilisateurs. Pour un canal à évanouissement avec bruit industriel, le rapport signal/bruit est réduit de 8 dB pour une architecture avec 16 utilisateurs utilisant un code convolutif et de 5 dB pour 32 utilisateurs utilisant un code RS, comme indiqué sur la figure 22. Pour une meilleure illustration, le tableau 2 montre les différentes valeurs du SNR pour un taux d'erreur binaire linéaire fixe de 0,1 en utilisant ou non un codage correcteur d'erreurs. Nous en concluons que pour la communication sur un canal industriel à évanouissement, le codage RS est optimal pour une architecture à 32 utilisateurs. Cependant, le code convolutionnel est optimal pour une architecture à 16 utilisateurs. Dans le cas d'une architecture à 8 utilisateurs, les codes convolutifs et RS sont égaux (tableau 2).



(a)

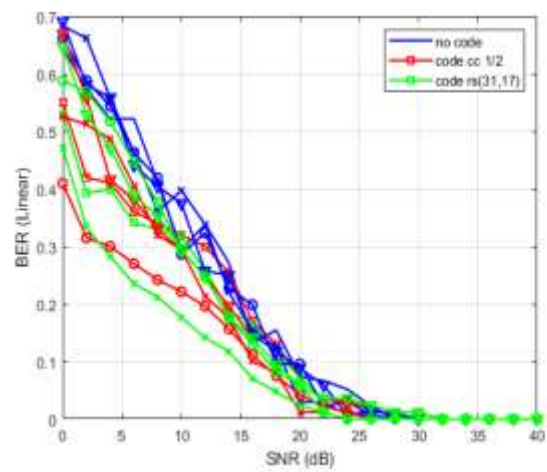


(b)

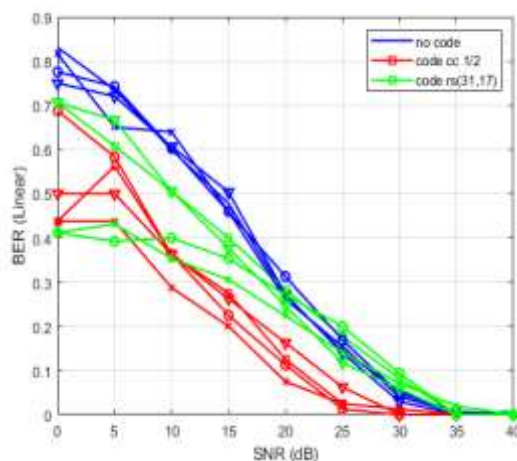


(c)

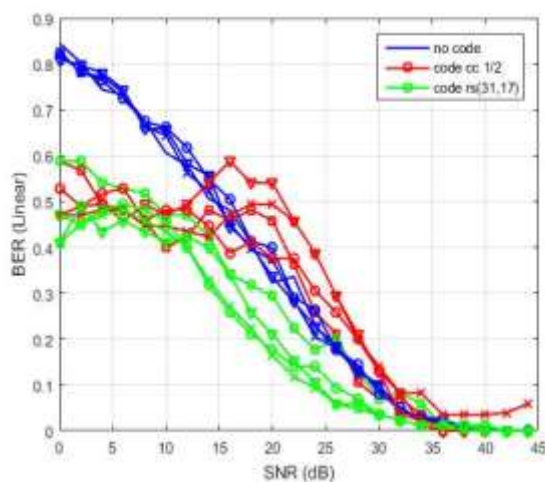
Figure 21 BER/SNR sur un canal à évanouissement avec bruit AWGN pour le mode MtO



(a)



(b)



(c)

Figure 22 BER/SNR sur un canal à évanouissement avec bruit industriel pour le mode MtO

	Nombre des capteurs	Sans code	code convolutional 1/2	RS (31,17)
Canal à évanouissement avec bruit AWGN	8	14 dB	12 dB	12 dB
	16	12 dB	14 dB	14 dB
	32	14 dB	12 dB	10 dB
Canal à évanouissement avec bruit industriel	8	20 dB	18 dB	18 dB
	16	28 dB	20 dB	26 dB
	32	30 dB	28 dB	25 dB

Tableau 2 Les paramètres du système avec codage

3. Performances : DWPT vs OFDM

A. OFDM : état de l'art

Pour les applications à large bande, les techniques de modulation multi-porteuses sont les plus largement adoptées par les normes de communication sans fil (802.11a, 802.11g "WiFi" et 802.16 "WiMax"). La modulation OFDM (Orthogonal Frequency Division Modulation) est une technique de modulation

multi-porteuse. Cette technique consiste à distribuer le signal sur un grand nombre de sous-porteuses orthogonales modulées individuellement à de faibles débits binaires. Cela permet d'atteindre une efficacité spectrale très proche de l'optimum, mais fournit également une excellente résistance à l'évanouissement de fréquence du canal [NEE00].

Cependant, le principal inconvénient de cette technique est que le récepteur nécessite une synchronisation précise de la fréquence à la réception et à l'émission [NEG00, PIN18]. Tout décalage entre les deux fréquences entraîne une perte d'orthogonalité des sous-porteuses, créant ainsi des interférences entre elles. Ce problème de synchronisation se pose en particulier lorsque les capteurs sont mobiles à des vitesses différentes. Dans ce passage, les capteurs sont stationnaires ou à faible mobilité, de sorte que la synchronisation n'est pas une contrainte particulière. D'où le choix de comparer notre architecture d'impulsion à un système avec une modulation multi-porteuse.

La modulation OFDM est basée sur la transformée de Fourier discrète (DFT). Elle utilise un préfixe cyclique (CP) qui est un temps de garde ajouté pour annuler l'interférence des symboles causée par les trajets multiples lors de la propagation sans fil. Cependant, l'ajout du CP augmente la largeur de bande occupée par les symboles OFDM. De plus, cette technique utilise des porteuses sinusoïdales à grands lobes dans la gamme de fréquences qui provoquent généralement une grande sensibilité aux interférences à bande étroite [KAN18]. OFDM utilise les séries exponentielles complexes comme fonctions de modulation de base. Ces fonctions sont limitées dans le domaine temporel par l'utilisation de porteuses sinusoïdales tandis que la modulation par paquets d'ondelettes utilise les paquets d'ondelettes comme fonctions de modulation multi-porteuse. Ces paquets d'ondelettes sont obtenus en utilisant la Transformation Discrète des Paquets d'Ondelettes (DWPT), qui est conçue par des techniques de filtrage numérique. Le signal d'entrée est décomposé en une banque de filtres par un filtre passe-bas et un filtre passe-haut. Par conséquent, les sorties du filtre passe-bas et du filtre passe-haut sont ensuite échantillonnées par deux pour donner respectivement des coefficients d'approximation et de détail.

B. Simulations

Dans cette section, les résultats de simulation sont présentés pour montrer la comparaison des performances du DWPT et de l'OFDM en termes de taux d'erreur binaire (BER) et de rapport signal/bruit (SNR) dans un canal industriel sans fil à trajets multiples. L'architecture du DWPT utilise une modulation par impulsions avec ondelette « Symlet ». L'échelle d'analyse est utilisée avec une profondeur de 4, ce qui permet d'envoyer 16 signaux d'entrée, soit 16 sous-canaux différents.

Trois modulations numériques sont utilisées pour tester le système OFDM ; BPSK (Binary Phase Shift Keying), QPSK (Quadrature Phase Shift Keying) et QAM-16 (Quadrature Amplitude Modulation), le logiciel Matlab est utilisé comme outil de simulation, et les paramètres de simulation sont spécifiés dans le tableau 3.

	OFDM	DWPT
Modulation	BPSK, QPSK, QAM16	Pulse Modulation
Nombre des sous-canaux	16	16
Ondelette	-	Symlet
Les points FFT	128	-
Prefix cyclique	20% of the period	-

Tableau 3 Les paramètres de simulation

Les résultats de la simulation sont présentés dans les figures 23 ,24 et 25 pour comparer le BER/SNR d'un système OFDM avec un système DWPT sur un canal à évanouissement avec bruit blanc gaussien additif (canal AWGN) et sur un canal industriel à évanouissement respectivement. Les résultats démontrent clairement la robustesse du système DWPT sur un canal AWGN et un canal industriel par rapport au système OFDM. L'architecture permet d'obtenir des résultats de BER/SNR inférieurs à ceux d'un système OFDM pour les modulations numériques BPSK, QPSK et QAM-16.

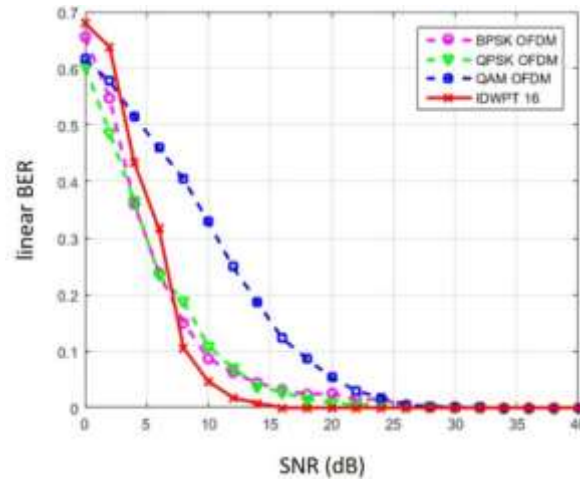


Figure 23 BER/SNR pour DWPT vs OFDM sur un canal AWGN

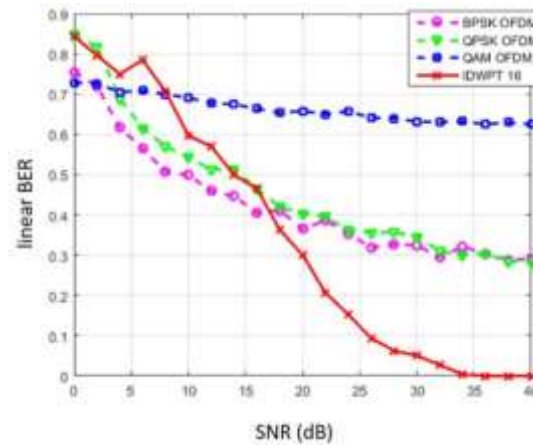


Figure 24 BER/SNR pour DWPT vs OFDM sur un canal industriel à évanouissement (16 capteurs)

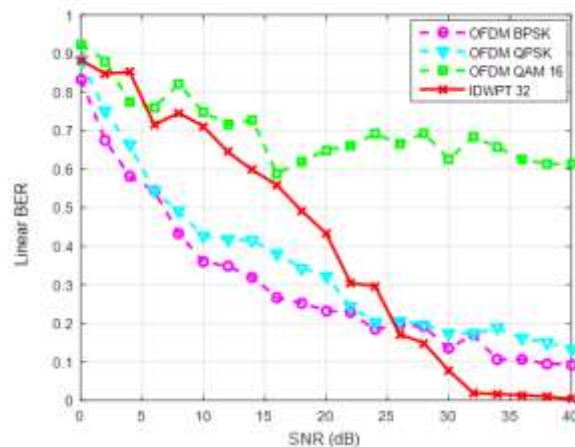


Figure 25 BER/SNR pour DWPT vs OFDM sur un canal industriel à évanouissement (32 capteurs)

Si l'on tient compte du bruit industriel, le système OFDM ne fonctionne pas correctement, comme l'illustre la figure 23. Ici, notre architecture démontre sa robustesse au bruit industriel même sans utiliser un récepteur optimal pour réduire le bruit ni une technique d'égalisation pour contrer les effets des trajets multiples. Il est clair que pour un système de communication sans fil dans un environnement industriel difficile, notre système DWPT est plus apte à rendre la communication plus fiable que les systèmes classiques basés sur l'OFDM. Une comparaison du BER/SNR de 20dB sur un canal AWGN et un canal à évanouissement avec le bruit industriel est présentée dans le tableau 4.

	IDWPT/DWPT	OFDM-BPSK	OFDM-QPSK	OFDM-QAM16
Canal à évanouissement avec bruit AWGN	0	0.04	0.01	0.15
Canal à évanouissement avec bruit industriel	0.3	0.37	0.4	0.65

Tableau 4 Comparaison des BER pour un SNR=20dB

III. Conclusion

Une architecture multi-utilisateur robuste basée sur l>IDWPT en émetteur et le DWPT en récepteur sous un canal industriel a été présentée dans ce chapitre. Le canal industriel a été modélisé comme un environnement à évanouissement affecté par un bruit impulsif combiné à l'AWGN. L'architecture de réseau de capteurs sans fil présentée, avec ses deux modes de communication MtO et OtM, offre de meilleurs résultats en termes de réception de données pour un environnement industriel bruyant. La robustesse de l'architecture est améliorée utilisant le codage de canal ainsi que le seuillage du bruit industriel à la réception. En utilisant un code de correction d'erreurs classique avec un taux de $1/4$, la robustesse du mode MtO a été fortement améliorée et tous les signaux sont entièrement décodés à partir d'un SNR de 8dB sur un canal à évanouissement. En mode MtO, les signaux sont décodés à partir de 6 dB sur le même canal. En utilisant un récepteur à seuil optimal, les erreurs sont éliminées d'environ 25 dB pour les modes MtO et OtM sur un canal industriel bruyant. Nous avons également développé une comparaison entre deux systèmes de communication DWPT/IDWPT et OFDM dans deux environnements de communication avec deux types de bruit : le bruit blanc et le bruit industriel. La comparaison de l'architecture proposée avec un système modulé OFDM multi porteuses a montré une meilleure robustesse de notre architecture dans un environnement industriel bruyant. Les systèmes basés sur des modulations multi porteuses classiques sont moins adaptés aux communications dans des environnements difficiles avec des bruits impulsifs.

Chapitres 2.2 Conception matérielle

I. Introduction

Nos travaux de recherche sur cet axe ont débuté dans le cadre de la thèse de M.Chehaitly, en collaboration entre le laboratoire LGIPM, l'EMSI et l'Université Libanaise [SAA201, CHE191, CHE192, CHE181, CHE182, CHE183, CHE17, CHE151, CHE152]. Ces travaux visent principalement la conception matérielle de la transformée par paquet d'ondelette IDWPT/DWPT. L'application s'oriente vers les systèmes de communication sans fil. Il s'agit d'une continuité des travaux des thèses de S.Saadaoui et A.Khalil ce qui concerne l'aspect implémentation matérielle. L'idée consiste à valider l'architecture de la transformée par paquet d'ondelette, visant des performances élevées et une conception à faible coût. Ceci est assuré notamment grâce au partage intelligent des ressources matérielles entre les différents filtres de l'algorithme DWPT. La démarche consiste à comparer les architectures développées pour la première génération de DWPT, basée sur l'algorithme de Mallat, et celles de la deuxième génération de DWPT, basée sur le lifting-scheme. Ces architectures aideront au calcul de la DWPT à des taux d'échantillonnage élevés (jusqu'à 750 méga-échantillons par seconde) tout en basant sur des ressources matérielles limitées, et sans utilisation de la mémoire dans les différentes étapes de profondeur de la transformation DWPT / IDWPT. L'idée consiste au développement d'une architecture générique DWPT/IDWPT tout en basant sur une forme particulière des filtres FIR.

Il est important de noter que lors de ces dernières années la technologie FPGA a subi des changements importants, notamment en termes d'échelle d'intégration. Elle est devenue ainsi une plateforme populaire en tant que cible technologique dans divers domaines d'application. Les FPGA ont montré leurs performances aussi bien dans le domaine du traitement numérique, dont ils sont particulièrement adaptés à l'implémentation des architectures spécifiques à haute performance. Donc, ils sont choisis comme cible privilégiée pour l'implémentation des transformées en ondelettes DWT et DWPT à haut débit [LAS06, CHE15 et CHE16].

L'implémentation efficace de la transformée en ondelette est une tâche qui n'est du tout facile, car ceci dépend de la nature de l'application. Le compromis entre les différentes contraintes, la vitesse de traitement, le coût d'implémentation, la consommation d'énergie, diffère d'une application à une autre. Cela motive l'effort des travaux de la thèse de M.Chehaitly vers le développement d'architectures innovantes et efficaces (DWPT et IDWPT), ciblant l'implémentation sous FPGA. Dans cet axe, nous souhaitons proposer des architectures DWPT offrant un niveau élevé de performance, pour une implémentation à faible coût, et pour des applications de communication sans fils dans un milieu industriel.

Plusieurs travaux ont été proposés dans la littérature visant l'implémentation de la transformée en ondelette. Les auteurs dans [VIS96, MOT03] proposent une architecture commune pour les DWT et IDWT, en vue d'une implémentation matérielle efficace. Les travaux dans [DEN94] se focalisent sur l'implémentation d'une architecture orthonormée de DWT, dans laquelle ils combinent une structure en filtre miroir quadratique (QMF) avec une technique de traitement numérique en série. Dans [WU03], les auteurs cherchent à minimiser le nombre d'additionneurs et de multiplicateurs dans les filtres

symétriques, en utilisant des codes d'instruction intégrés. Quant aux architecture DWT rapide sur FPGA, Les auteurs dans [JIN07] proposent l'arithmétique distribuée avancée (IDA), tandis que dans [WU11], ils mettent en œuvre une structure de pipeline à plusieurs étages. Dans [PAL06], les auteurs souhaitent mettre en œuvre une architecture DWT bidimensionnelle sur FPGA. Une architecture à haut débit est introduite [HU13] pour les DWT bidimensionnels basés sur le levage. Les travaux dans [FAT03,] présentent une architecture de DWPT en pipeline et programmable basée sur un lifting-scheme.

Afin de réduire la complexité du matériel, les auteurs dans [SOW16] ont développé une nouvelle architecture de DWT basée sur le calcul distributif coextensif. Dans [HAT01], ils proposent une architecture DWT mixte parallèle/séquentielle pour réduire le nombre de multiplicateurs requis dans la structure des filtres. Les auteurs dans [PAY03] présentent une nouvelle architecture pour les DWT basée sur le lifting-scheme dans lequel un algorithme classique de pyramide récursive (RPA) et la décomposition polyphasée sont employés. Dans l'implémentation du DWPT/IDWPT présentée par [ACH97], une architecture systolique est proposée pour le DWT avec un nombre fixe de pages d'exigences. Dans [FAR06], ils présentent une nouvelle approche pour l'implémentation du DWPT basée sur une architecture de pipeline mot-série et sur des filtres parallèles. Parallèlement à cette approche purement matérielle, certains travaux de recherche se sont également concentrés sur une approche plus logicielle avec laquelle le DWPT/IDWPT est calculé sur des processus parallèles, visant à minimiser les ressources de calcul nécessaires (processeurs de réseau ou cœurs de processeur concurrents) et à optimiser l'équilibre moyen du calcul distribué.

Malgré tous ces travaux, la mise en œuvre effective de la transformée en ondelette sur FPGA est encore en stade immature. Cependant, il reste du chemin à parcourir avant de résoudre ce défi de manière satisfaisante : développer une architecture générique et configurable/paramétrable, indépendante de tout type spécifique d'ondelette. L'architecture doit être aussi capable de faire face à un large éventail d'applications cibles et de contraintes, y compris celles relatives au débit et à la consommation de surface la plupart du temps, ainsi que d'autres telles que la consommation d'énergie ou la fiabilité.

Nos travaux viennent pour minimiser les besoins massifs en ressources matérielles et les architectures complexes introduites par les approches traditionnelles de la transformation en ondelettes. La conception repose sur le partage intelligent des ressources de calcul matérielles (multiplicateurs et additionneurs) entre les différents filtres et étapes de l'architecture DWPT. Tout en préservant une approche hautement configurable et générique (pré et post-synthèse). Nous avons introduit cette nouvelle architecture générique de pipeline parallèle pour les transformées DWPT / IDWPT de première génération, algorithme d'arbre de Mallat [MAL89], et de deuxième génération (lifting-scheme). L'objectif est éventuellement de garantir un faible coût matériel et une vitesse de traitement élevée par conception.

Nous présenterons, durant ce chapitre, l'impact de différents paramètres de conception tels que la quantification des coefficients, la profondeur de transformation, l'ordre de filtrage et la famille d'ondelettes sélectionnée sur les performances de calcul et le coût du matériel (consommation de ressources ou de surface). Il faut noter que les architectures ont été modélisées en VHDL au niveau RTL et synthétisées à l'aide d'Altera Quartus Prime Lite, ciblant un FPGA Intel/Altera Cyclone-V. L'implémentation nous a permis de calculer la DWPT à plus de 750 MS/s (méga-échantillons par seconde) tout en consommant au maximum 742 éléments logiques et 1576 registres logiques. En outre, le modèle proposé a été développé sans faire appel aux ressources de banque de mémoire entre ou dans les différentes étapes de profondeur de la transformation DWPT / IDWPT.

II. Les architectures linéaires et non parallèles

Cette partie est consacrée à la présentation de la première proposition architecturale, appelée première génération linéaire de DWPT / IDWPT. Il s'agit d'une architecture linéaire et pipeline à haut débit, utilisant l'approche arborescente de Mallat basée sur des filtres FIR numériques transposés modifiés au niveau des bancs de filtres.

1. Architecture linéaire de pipeline DWPT : première génération

La théorie de la transformée en ondelettes repose sur une structuration arborescente illustrée dans la figure 26 (DWPT sur trois niveaux). Cette architecture est basée sur l'approche de Mallat, utilisant des blocs de bancs de filtre. Dans cet exemple, l'architecture présente (2^3) sous-bandes de fréquence, d'une bande de fréquence d'entrée (et 2^k sous-bandes de fréquence à l'étape k). Quant au $H(n)$ et $G(n)$, ils représentent les filtres passe-bas et passe-haut, respectivement, basant sur dans bancs de filtre pour la construction de la transformée en ondelettes. Ils sont liés aux fonctions de transfert $H(Z)$ et $G(Z)$ dans les équations (13) et (14), respectivement, comme proposé dans [MAL99].

$$H(Z) = H_0 + H_1 z^{-1} + H_2 z^{-2} + \dots + H_{L-1} z^{-(L-1)} \quad (13)$$

$$G(Z) = G_0 + G_1 z^{-1} + G_2 z^{-2} + \dots + G_{L-1} z^{-(L-1)} \quad (14)$$

Où z^{-1} indique un retard de $1 \times$ la période d'échantillonnage.

Ces filtres sont représentés par des filtres FIR. Ils ont une caractéristique spécifique qui fait que chaque filtre d'une étape k donnée utilise une quantité de données dont seulement la moitié sera traité pas n'importe quel filtre de l'étape $k-1$. Ainsi, le facteur d'échantillonnage d'un étage à l'autre dans le DWPT est de l'ordre de 2^{-1} et le nombre de filtres passe-bas et passe-haut est de 2^k dans un étage k .

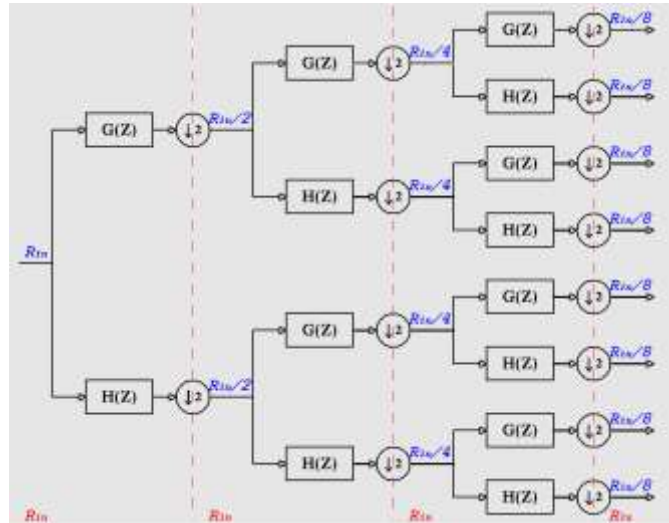


Figure 26 Arbres de décomposition DWPT à trois niveaux

Sur cette base, nous avons développé une nouvelle architecture arborescente en réduisant le nombre de filtres dans chaque étape à un seul filtre FIR modifié (figure 27). Par ailleurs, nous transformons une équation exponentielle en une équation linéaire, où nous implémentons dans chaque étape k un seul filtre modifié à la place des 2^k bancs de filtre. Donc, ce filtre FIR modifié doit garantir la possibilité de traiter la même quantité de débit de données de tous les filtres 2^k originaux au même stade k .

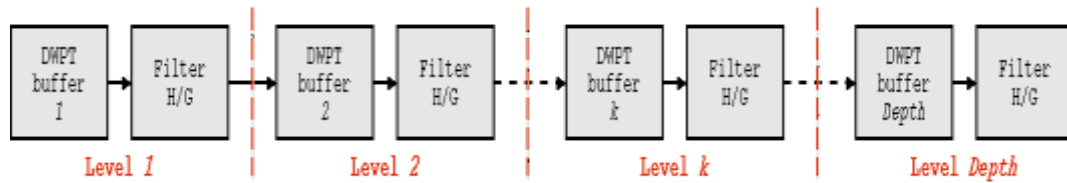


Figure 27 Bloc du chemin de données de l'architecture DWPT

La figure 28 présente la structure du filtre FIR modifié. La principale différence avec les filtres transposés est la stratégie de réduction du matériel utilisé. Donc, au lieu d'utiliser deux filtres (filtres passe-bas et passe-haut) chacun est caractérisé par un ensemble unique de coefficients dont ils dépendent directement de la famille d'ondelettes choisie, nous avons conçu un seul filtre modifié caractérisé par deux ensembles de coefficients utilisés alternativement par des cycles d'horloge consécutifs.

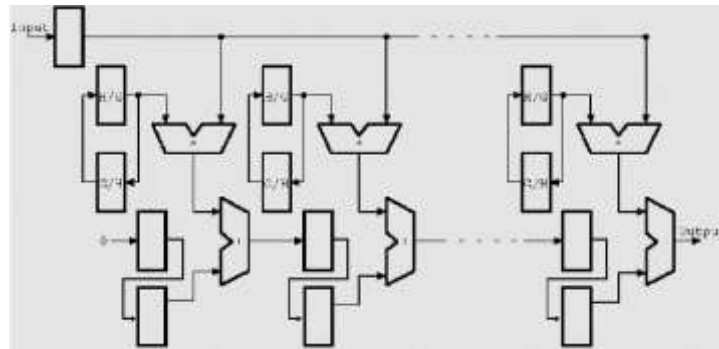


Figure 28 Architecture d'un seul filtre modifié FIR

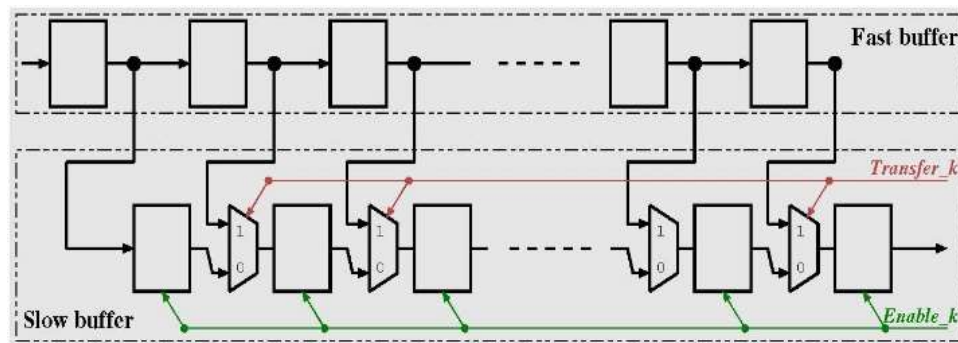


Figure 29 Structure de bloc buffer à l'étape k

Les résultats des opérations d'addition et multiplication, après chaque cycle d'horloge, seront enregistrés puis décalés consécutivement dans des blocs buffer afin d'assurer le suivi des données entre les différentes étapes de l'arbre (figure 29). Ce bloc buffer joue un rôle primordial dans l'alimentation des données correctement programmées (liées à $H(Z)$ (ou $G(Z)$) puis $G(Z)$ (ou $H(Z)$) et dans un cycle consécutif pour éviter l'entrelacement entre les différentes étapes de décomposition. La procédure de fonctionnement des blocs buffers est comme suit :

- k est un paramètre de l'étape actuelle, où le bloc buffer est implémenté.
- La taille des blocs buffer dépend de k .
- Chaque bloc buffer est construit à base deux sous-blocs de vitesse : un bloc à grande vitesse appelé « *Fast Buffer* » et un bloc à faible vitesse appelé « *Slow Buffer* ». Les registres du sous-bloc « *Fast Buffer* » de l'étape k reçoivent les données de la sortie de l'étape précédente

- ($k-1$) et les registres du sous-bloc « *Slow Buffer* » sont alimentés par les données provenant des registres « *Fast Buffer* » de la même étape.
- d) Pour le sous-bloc "*Slow Buffer*", nous avons utilisé un signal spécifique (en vert) appelé « $enable_k$ ». Ce signal contrôle le taux de décalage entre les différents registres du « *Slow Buffer* ».
 - e) Le signal « $Transfer_k$ » a pour but de contrôler le transfert de données d'un sous-bloc rapide à un sous-bloc lent dans une étape k . Il donne l'accord pour transférer toutes les données des registres du « *Fast Buffer* » aux registres du « *Slow Buffer* » simultanément dans chaque cycle d'horloge de 2^k .
 - f) Les caractéristiques d) et e) sont répétées dans chaque étape k pour toute la décomposition de l'arbre.

Il faut signaler que le point critique de ce modèle est la synchronisation entre les registres dans les sous-blocs lents et rapides. Pour remédier à ça, le *fast buffer* est décalé d'un pas, tandis que le *Slow Buffer* est décalé d'un pas tous les deux cycles d'horloge. Les opérations d) et e) combinent le sous-échantillonnage 1/2 et la sélection/ordonnancement de l'échantillon à effectuer dans un seul bloc basé sur les registres sans utiliser les mémoires ou un bloc DSP. Seule la moitié des données traitées peut être transférée du *Fast buffer* au *Slow buffer* tous les 2^k cycles. Ce qui permet implicitement d'assurer la fonction de sous-échantillonnage (figure 30).

Il est important de mentionner que dans cette nouvelle architecture respecte le traitement suivant l'arbre Mallat à chaque étape. Les données de sortie de tous les filtres de chaque étape sont stockées dans des blocs de *buffer* avec un arrangement ordonné entrelacé pour préparer les données à l'étape suivante.

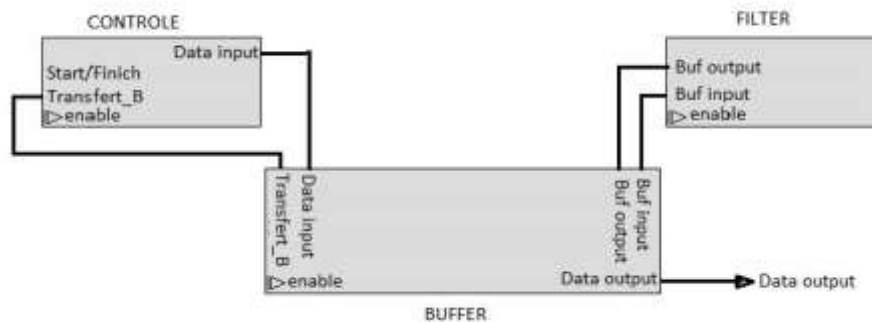


Figure 30 Bloc de contrôle

2. Architecture linéaire de pipeline IDWPT : première génération

Nous proposons dans ce passage la reconstruction de la première architecture à savoir IDWPT. Cette architecture est capable de fournir les mêmes performances élevées ciblant la même stratégie : consommation de ressources à faible coût.

Suivant Mallat, la reconstruction du signal original est un processus inverse des coefficients DWPT comme le montre la figure 31. Donc, la reconstruction du signal d'origine est parfaite car H , G , $\bar{H}$ et $\bar{G}$ représentent des filtres QMF (Quadratic Mirror Filter). Alors, $\bar{h}$ et $\bar{g}$ représentent les filtres de reconstruction passe-bas et passe-haut pour l'IDWPT, $\bar{H}$ et $\bar{G}$ représentent leurs fonctions de transfert respectivement.

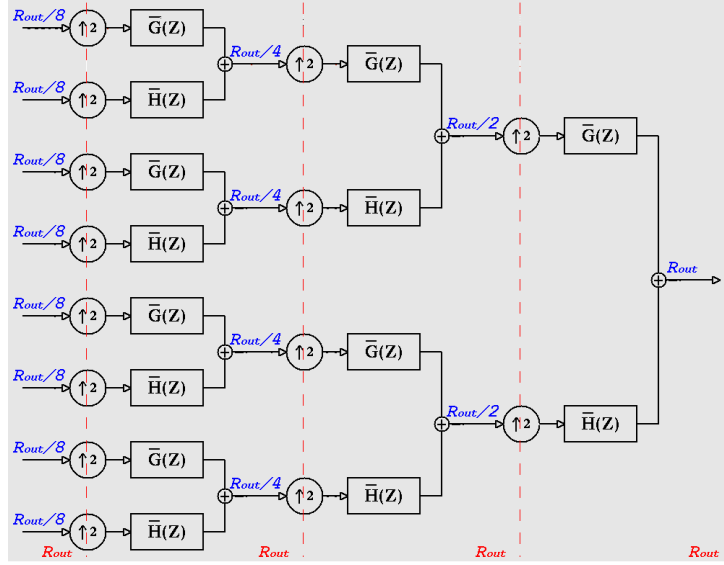


Figure 31 Trois niveau de l'arbre de synthèse des paquets d'ondelette

Dans la même logique que la transformée directe, la transformée inverse a également une grande régularité à chaque étape k des filtres. Ces filtres sont capables de traiter $2^{\text{profondeur}-k}$ multiplié à la quantité à traiter par le filtre à l'étape 1. À chaque étape k , la quantité totale de données filtrées par tous les filtres est égale à celle filtrée à l'étape $k-1$ et elle est la même qu'au niveau 1 ($2^{-k} \times 2^k = 1$). Le nombre de filtres passe-bas et passe-haut est de 2^k dans un étage k donné.

En considérant la régularité, il est naturel de penser à éliminer les blocs répétés et à réduire ensuite le nombre de filtres dans toutes les étapes. Donc, nous développons un seul filtre modifié dans chaque étape k un seul filtre modifié au lieu des filtres de banques 2^k . De plus, le filtre FIR unique modifié offre la possibilité de traiter la même quantité de débit de données de tous les filtres 2^k originaux à la même étape k (figure 32).



Figure 32 Bloc du chemin de données de l'architecture IDWPT

Les blocs du filtre $\bar{H} / \bar{G}$ présente les filtres FIR de reconstruction modifiée dont la structure est illustrée à la figure 33. Nous avons conçu un seul filtre FIR modifié, respectant le schéma de base du filtre FIR transposé, au lieu d'utiliser des filtres 2^k à chaque étape k , caractérisé par deux ensembles de coefficients utilisés alternativement par des cycles d'horloge consécutifs.

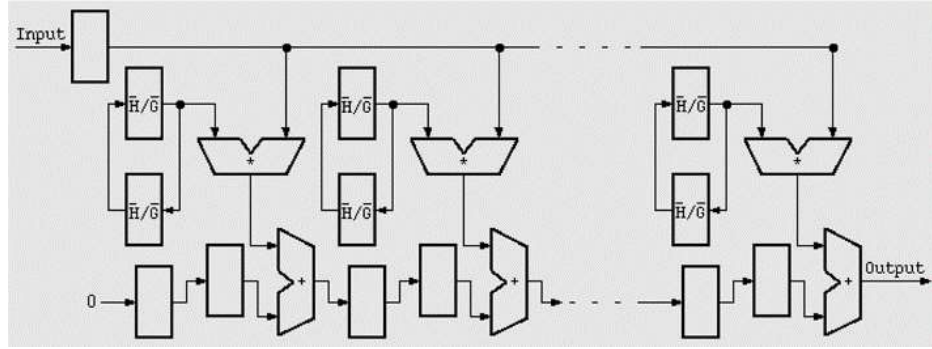


Figure 33 Architecture u filtre transposé modifié

L'élément clé de notre architecture est les blocs *buffer* qui assurent l'alimentation des données entre les différentes étapes de l'arbre sans aucune réorganisation ou reconfiguration extérieure. Nous avons ajouté une unité de contrôle, pour gérer les blocs buffer et les blocs filtres. Ce bloc assure la génération des signaux « $enable_k$ » et « $Transfer_k$ » à l'étage k correspondant. Donc, nous avons respecté dans la conception la même quantité de traitement de données exigés par l'arbre de Mallat à chaque étape. Cependant, le modèle développé garantit une conception performante et peu coûteuse, sans aucune mémoire de bloc supplémentaire pour stocker les données ni aucun bloc DSP pour accélérer le fonctionnement, comme nous le démontrerons dans la partie résultats.

3. Résultats de la synthèse

Dans cette partie, nous présentons des résultats de synthèse permettant de valider l'architecture proposée. Nous définissons aussi les caractéristiques et les performances en fonction de la fréquence d'horloge et de la consommation de matériel. Les ressources consommées et la fréquence d'horloge associée des premières architectures DWPT et IDWPT linéaires et non parallèles sont présentées dans le tableau 5.

Ces nouvelles architectures en pipeline (DWPT / IDWPT) sont entièrement reconfigurables à la synthèse dont les paramètres de configuration sont la profondeur de l'arbre. Ces nouvelles architectures sont partiellement reconfigurables après la synthèse avec l'ordre des filtres FIR modifiés. Ce qui signifie, qu'il est possible de changer la famille d'ondelettes utilisée sans revenir à l'architecture de resynthèse. Et dans ce cas, les coefficients de filtrage de l'ondelette correspondante sont chargés dynamiquement après la synthèse (tout en gardant le même ordre de filtrage).

Dans le tableau 5, nous présentons l'effet de ces paramètres des architectures DWPT et IDWPT proposées sur la vitesse de traitement des données, avec les registres logiques nécessaires l_r et les éléments logiques l_e . Nous avons observé que la fréquence d'horloge est réduite en moitié environ, passant de 243,61 MHz à 122,3 MHz et de 207,68 MHz à 104,14 MHz dans les architectures IDWPT / DWPT respectivement, lorsque nous augmentons l'ordre de quantification de 5 à 16 avec une profondeur et un ordre de filtrage fixes. Ces résultats sont déterminés sans présence de mémoire ou de bloc DSP.

Paramètres de conception (Profondeur, ordre de filtrage, et quantification)	Fréquence de l'horloge (MHz)		Utilisation des ressources (l_e, l_r)		Les blocs DSP
	DWPT	IDWPT	DWPT	IDWPT	
(2, 2, 5)	207.68	243.61	(158, 74)	(38,78)	0
(3, 2, 5)	194.93	235.79	(252, 130)	(58,130)	0

(4, 2, 5)	200.28	221.73	(397, 233)	(95,222)	0
(2, 4, 5)	205.25	232.94	(296, 114)	(49,102)	0
(3, 4, 5)	181.23	228.57	(446, 180)	(71,156)	0
(4, 4, 5)	187.69	218.77	(647, 293)	(108,250)	0
(2, 16, 5)	178.99	214.64	(1103, 354)	(114,246)	0
(3, 16, 5)	179.73	220.6	(1598, 480)	(139,312)	0
(4, 16, 5)	170.36	208.51	(2138, 653)	(179,418)	0
(2, 2, 16)	104.14	224.42	(857, 228)	(106,230)	0
(3, 2,16)	101.31	215.56	(1332, 405)	(172,391)	0
(4, 2,16)	104.94	214.09	(1940, 717)	(282,680)	0
(2, 4,16)	102.54	224.57	(1676, 356)	(137,294)	0
(3, 4,16)	97.30	215.1	(2507, 565)	(202,455)	0
(4, 4,16)	92.06	213.22	(3473, 909)	(316,744)	0
(2, 16,16)	106.73	212.22	(1609, 1108)	(330,678)	0
(3, 16,16)	109.66	204.71	(2250, 1493)	(394,839)	0
(4, 16,16)	111.96	199.4	(3032, 2013)	(508,1128)	0

Tableau 5 Résultats d'implémentation des architectures pipeline DWPT et IDWPT

III. Architectures DWPT /IDWPT p-parallèle et pipelines proposés

Dans cette partie, nous précédon au développement d'une architecture P-parallèle ultime DWPT/DWPT, pour un débit élevé et une vitesse de traitement supérieure. Cette architecture garde une implémentation générique ainsi qu'une flexibilité de configuration avant et après synthèse. Dans cette architecture, nous avons utilisé un nouveau paramètre de reconfiguration à savoir : degré de parallélisme P.

Nous avons commencé à paralléliser l'arbre du Mallat, dont nous mettons plusieurs cœurs en parallèle afin de traiter les données. Les figures 34 et 35 présentent respectivement l'architecture DWPT p-parallèle et l'architecture IDWPT p-parallèle.

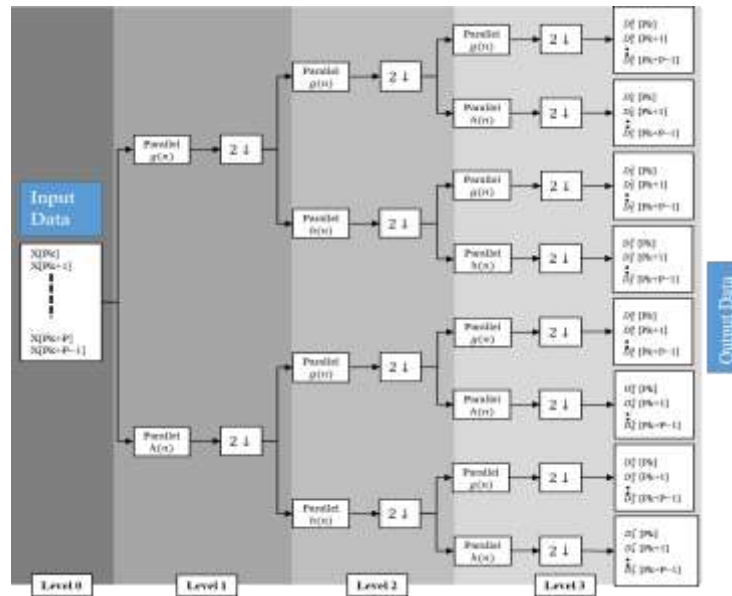


Figure 34 Architecture DWPT P-Parallèle à trois niveaux

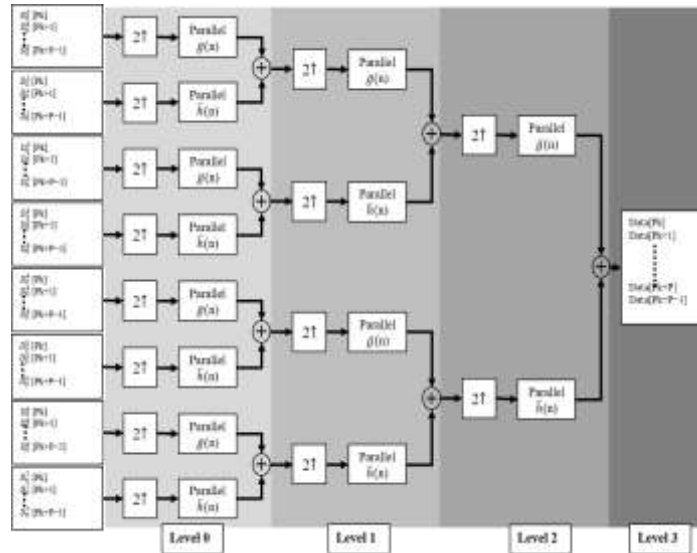


Figure 35 Architecture IDWPT P-Parallèle à trois niveaux

Ces architectures montrent la mise en parallèle de l'arbre de Mallat basant sur un filtre FIR P-parallèle. Ce filtre est composé de fonctions d'ondelettes capables de traiter l'échantillonnage P dans chaque cycle d'horloge. Cette architecture augmente, d'une manière significative, le débit en augmentant simultanément le nombre nécessaire de filtres de reconstruction ou de décomposition en fonction de l'ordre de profondeur, qui est d'environ $P \times 2^{\text{profondeur}+1} - 1$. Par exemple, pour implémenter une architecture DWPT/IDWPT avec une profondeur = 6 et un degré de parallélisme $P=32$, nous avons besoin de $32 \times 2^{6+1} - 1 = 4064$ filtres pass bas / passe haut. Cette explosion des ressources matérielles est un problème potentiel qui rend l'implémentation irréalisable.

Pour remédier à ce problème, nous avons développé une architecture DWPT-IDWPT massivement parallèle au pipeline avec un partage massif des ressources utilisées.

1. Architecture de pipeline P-Parallèle DWPT : première génération de DWPT

En se basant sur le filtre transposé modifié FIR déjà décrit, nous souhaitons développer un modèle unique capable de filtrer un échantillonnage P tous les deux cycles d'horloge. Nous respectons les contraintes visant à minimiser la consommation de ressource matérielle en utilisant un partage intelligent des éléments de calcul à savoir : multiplicateurs et additionneurs. Ce partage est assuré entre les fonctions d'approximation/détail liées aux bancs de filtres H/G. Ce qui nous a permis de développer une nouvelle génération d'architecture hétérogène DWPT / IDWPT. Cependant, cette voie offre la possibilité de traiter P signaux d'entrée (échantillonnage) et par conséquent P signaux de sortie (échantillonnage) dans chaque cycle d'horloge, comme le montre la figure 36.

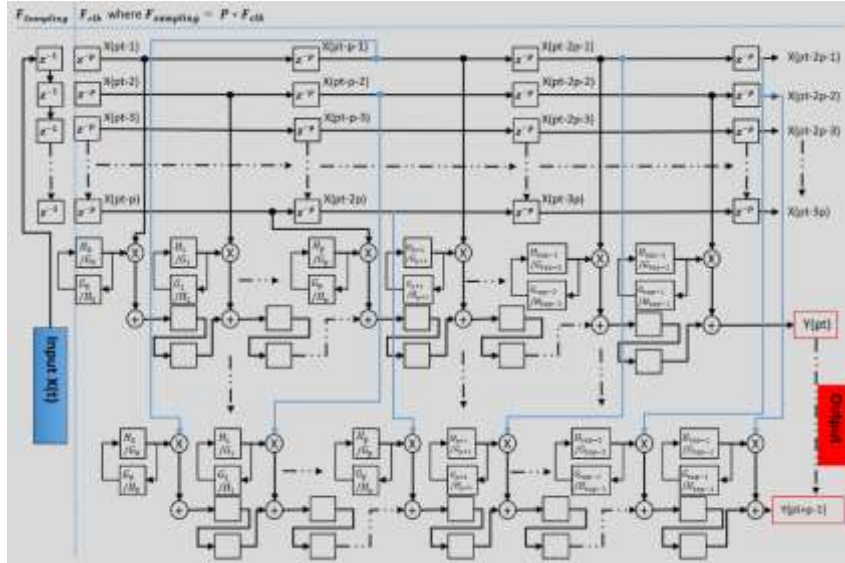


Figure 36 Architecture d'un seul filtre FIR modifié

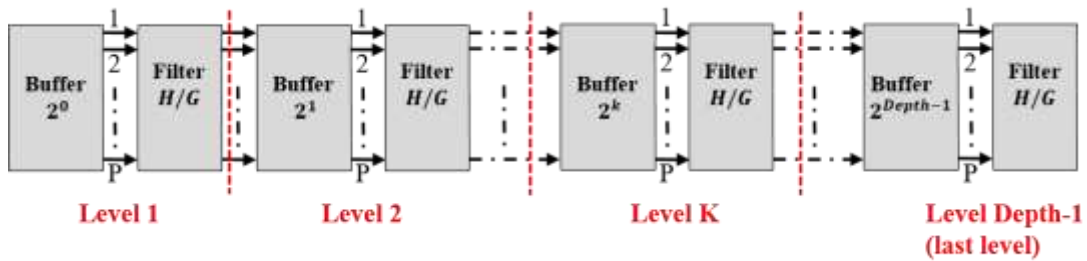


Figure 37 schéma du cheminement des données de l'architecture p-parallèle DWPT

Nous assurons donc à travers cette architecture un débit élevé avec des ressources matérielles plus faibles en fusionnant l'arbre de Mallat linéarisé et le filtre FIR transposé en parallèle. L'architecture est générique, reconfigurable, linéaire et P-parallèle basant sur un fonctionnement MIMO (Multiple-Input Multiple-Output) dont les blocs H/G sont des filtres FIR modifiés en parallèle. Le traitement des coefficients, des filtres passe-bas et passe-haut ainsi que la programmation aux différentes étapes, est assuré au niveau du "bloc Buffer". À chaque étape k de cette architecture, le volume des données à traiter est le même que celle de l'arbre binaire original de Mallat, mais multipliée par P (figure 37 et 38).

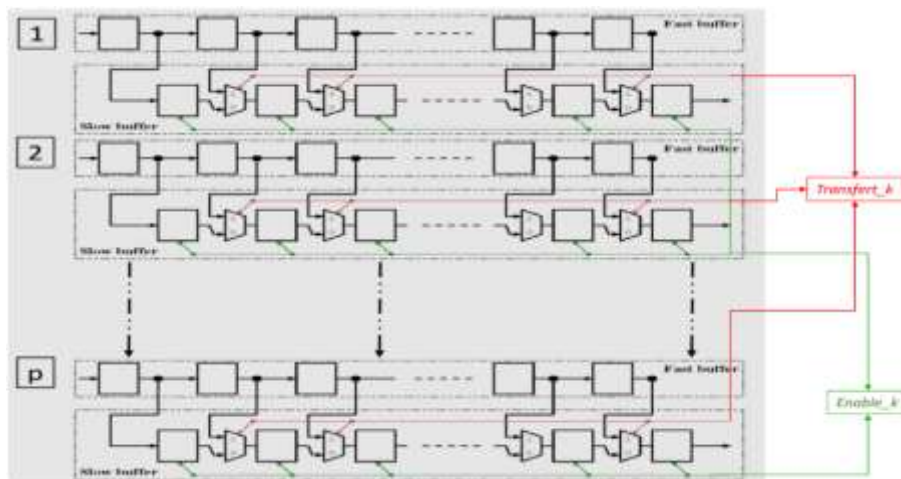


Figure 38 Structure du bloc Buffer K étape de l'architecture parallèle DWPT

Les paramètres et les étapes de fonctionnement des blocs Buffer sont comme suit :

- k est un paramètre de l'étape actuelle, où le bloc Buffer est implémenté. P est le degré de parallélisme.
- La taille des blocs Buffers dépend de k du degré de parallélisme P .
- Chaque bloc Buffer est constitué de P sous-blocs. Chaque sous-bloc est caractérisé par deux vitesses de registres/buffer dont un bloc à grande vitesse appelé « *Fast Buffer* » et un bloc à faible vitesse appelé « *Slow Buffer* ». Les registres du sous-bloc *Fast Buffer* de l'étape k prennent des données de la sortie de l'étape précédente ($k-1$) et réalisent un décalage P sur chaque cycle d'horloge. Les registres du sous-bloc « *Slow Buffer* » sont alimentés par les données provenant des registres du « *Fast Buffer* » de la même étape et réalisent un décalage P sur deux cycles d'horloge.
- Au niveau de « *Slow Buffer* », nous avons utilisé un signal spécifique (en vert) appelé $enable_k$ qui contrôle le taux de décalage entre les différents registres des *Slow Buffers*.
- " $Transfer_k$ " a pour objectif contrôler le transfert de données d'un sous-bloc rapide à un sous-bloc lent, techniquement dans une étape k donnée. Il donne la permission de transférer toutes les données des registres du tampon rapide aux registres du tampon lent simultanément dans chaque cycle d'horloge de 2^k .
- Les caractéristiques d) et e) sont répétées à chaque étape k sur tous les arbres en décomposition

Dans cette architecture, les données de sortie de tous les filtres de chaque étape sont stockées dans des blocs de mémoire buffer avec un arrangement ordonné et entrelacé pour préparer les données à l'étape suivante. Pour gérer l'ensemble des données entre les blocs Buffer et les blocs filtres, nous avons ajouté une unité de contrôle sous forme d'un bloc de contrôle central a pour objectif la génération de signaux " $enable_k$ " et " $Transfer_k$ " à l'étape k correspondant (figure 39).

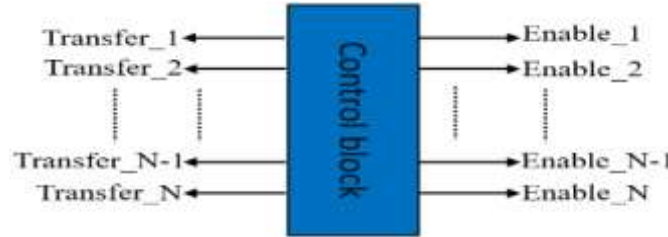


Figure 39 Unité de contrôle

2. Architecture de pipeline p-parallèle IDWPT : première génération

De la même manière que DWPT, IDWPT présente également une grande régularité où à chaque étape k filtres sont capables de traiter $P \times 2^{profondeur-k} \times$ la quantité à traiter par le filtre. Ainsi, le volume total de données, à l'étape k donnée, filtrée par tous les filtres est égale à celui filtrée à l'étape $k-1$ et il est le même qu'au niveau 1 ($P \times 2^{profondeur-k} \times 2^{-(profondeur-k)} = P$). Ainsi, le nombre de filtres passe-bas et passe-haut est $P \times 2^k$, dans un étage k donné où la moitié du débit de données est traitée avec tout filtre inférieur à ses voisins du côté sortie et deux fois supérieur à ses voisins du côté entrée. Alors, on observe que les filtres ont la même complexité à toutes les étapes et que la structure de l'arbre de Mallat comporte de nombreux blocs fonctionnels répétés.

Nous avons développé une architecture efficace IDWPT basée sur le même filtre FIR modifié P-parallèle déjà décrit. Dans cette nouvelle architecture, le nombre de bancs de filtres FIR nécessaires augmente

linéairement en fonction de l'ordre de profondeur. Nous réduisons le nombre de filtres FIR à un seul (filtre FIR simple P-parallèle modifié) au lieu de 2^k banques de filtres, à chaque étape k , dans la version originale (figure 40).

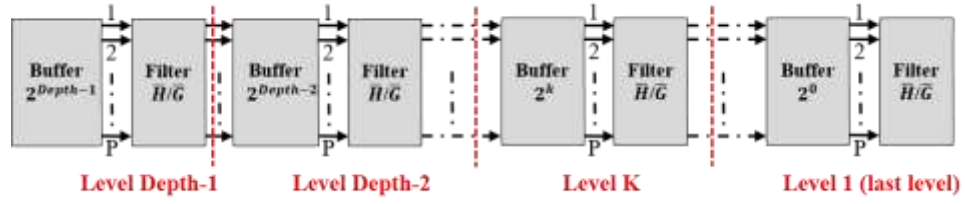


Figure 40 schéma du cheminement des données de l'architecture p-parallèle IDWPT

Le filtre à blocs $\bar{H} / \bar{G}$ présente la reconstruction modifiée des filtres FIR parallèles P . Ici, la structure est similaire au filtre FIR modifié dont la seule différence est au niveau des coefficients des filtres $\bar{H}(Z)$ et $\bar{G}(Z)$. Alors, cette nouvelle architecture P -parallèle peut traiter P échantillon en deux cycles d'horloge.

Les liens entre les blocs de filtres sont basés sur un composé spécial dans notre architecture à savoir "Buffer block" qui fournissent les données à gérer et à entrelacer entre les filtres en différentes étapes. Cette structure ne nécessite aucune réorganisation extérieure des données qui suivent et leur taille dépend du degré parallèle P et de l'étape k dans laquelle elle est mise en œuvre (figure 41).

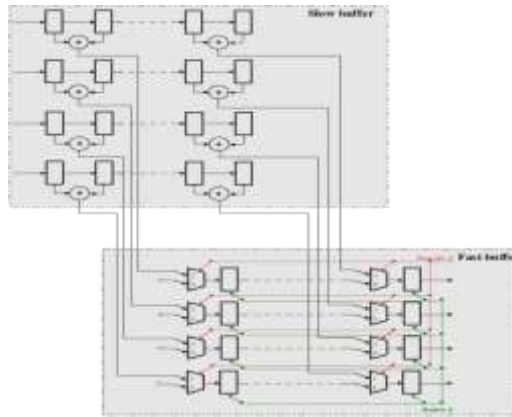


Figure 41 Structure du bloc buffer dans l'étape k avec un degré de parallélisme $P=4$

3. Résultats de la synthèse

Dans cette partie, nous présentons les performances et les résultats de synthèse de l'architecture IDWPT de première génération basée sur un filtre FIR P -parallèle modifié. La synthèse est réalisée à base des contraintes suivantes :

- La conception a été modélisée en VHDL au niveau RTL.
- Le degré de parallélisme doit respecter $P = 2^x, \forall x \in \mathbb{N}$. La valeur maximale de P est théoriquement illimitée. Nous prenons en considération les caractéristiques de la carte technologique cible.
- La synthèse est réalisée à l'aide du logiciel Altera Quartus premium lite edition. Nous avons choisi comme cible le FPGA Altera Cyclone V avec un grade de vitesse de -7.

Ces nouvelles architectures de pipeline de DWPT et IDWPT P -parallèle sont entièrement reconfigurables à la synthèse. Les paramètres de configuration sont la profondeur de l'arbre de DWPT

ou IDWPT, l'ordre des filtres FIR modifiés, la quantification des coefficients des filtres et le degré de parallélisme. Ils sont également partiellement reconfigurables après la synthèse avec l'ordre des filtres FIR modifiés. Donc, via ces architectures nous avons la possibilité de changer la famille d'ondelettes utilisée sans architecture de resynthèse où les coefficients de filtrage de l'ondelette correspondante sont chargés dynamiquement après la synthèse. Il faut noter que la seule contrainte est que les différentes familles d'ondelettes orthogonales utilisées doivent avoir le même ordre de filtrage.

Paramètres de conception (Profondeur, ordre de filtrage, et de quantification)	Fréquence d'horloge (MHz)		Utilisation des ressources (I _e , I _r)	
	DWPT	IDWPT	DWPT	IDWPT
(2, 2, 5)	203.8	205	(471,296)	(109, 186)
(3, 2, 5)	200.21	201.82	(756,510)	(166,312)
(4, 2, 5)	197.37	196.16	(1204,899)	(244,505)
(2, 4, 5)	200.87	152.88	(879,456)	(265,286)
(3, 4, 5)	185.05	152.58	(1299,719)	(379,442)
(4, 4, 5)	193.71	153.37	(1941,1171)	(483,665)
(2, 16, 5)	189.2	144.03	(3299,1416)	(1447,886)
(3, 16, 5)	192.3	137.44	(4794,1924)	(1983,1222)
(4, 16, 5)	185.08	136.24	(6397,2614)	(2457,1625)
(2, 2, 16)	122.62	132.36	(2571,905)	(578,582)
(3, 2,16)	119.79	135.34	(4216,1599)	(833,972)
(4, 2,16)	123.14	133.69	(5850,2853)	(1102,1572)
(2, 4,16)	120.56	104.57	(5038,1324)	(1594,902)
(3, 4,16)	118.57	102.77	(7521,2260)	(2174,1388)
(4, 4,16)	115.33	100.61	(10374,3636)	(2772,2084)
(2, 16,16)	114.16	94.14	(4902,4402)	(7719,2822)
(3, 16,16)	126.16	92.08	(6805,5729)	(10557,3884)
(4, 16,16)	124.23	90.49	(9107,7752)	(13469,5156)

Tableau 6 Résultats d'implémentation des architectures 4-parallèle DWPT et IDWPT

Paramètres de conception (Profondeur, ordre de filtrage, et de quantification)	Fréquence d'horloge (MHz)		Utilisation des ressources (I _e , I _r)	
	DWPT	IDWPT	DWPT	IDWPT
(2, 2, 5)	217.31	207.04	(1109,504)	(109, 186)
(3, 2, 5)	212.45	195.77	(1699,935)	(166,312)
(4, 2, 5)	213.4	198.73	(2754,1531)	(244,505)
(2, 4, 5)	217.9	147.15	(2120,897)	(265,286)
(3, 4, 5)	202.6	148.39	(3050,1197)	(379,442)
(4, 4, 5)	206.59	147.65	(4603,2023)	(483,665)
(2, 16, 5)	201.14	136.44	(7689,2447)	(1447,886)
(3, 16, 5)	202.16	133.05	(12176,3166)	(1983,1222)
(4, 16, 5)	196.82	131.56	(14956,4571)	(2457,1625)
(2, 2, 16)	95.77	128.75	(6079,1696)	(578,582)
(3, 2,16)	97.8	123.08	(9279,2735)	(833,972)
(4, 2,16)	98.82	128.04	(13489,5011)	(1102,1572)
(2, 4,16)	97.04	99.98	(12032,2582)	(1594,902)
(3, 4,16)	94.2	98.87	(17549,3965)	(2174,1388)
(4, 4,16)	88.01	98.95	(24311,6363)	(2772,2084)
(2, 16,16)	99.15	90.16	(11263,7856)	(7719,2822)
(3, 16,16)	102.89	86.02	(14750,11451)	(10557,3884)
(4, 16,16)	100.24	86.1	(21314,13091)	(13469,5156)

Tableau 7 Résultats d'implémentation des architectures 16-parallèle DWPT et IDWPT

Les paramètres des architectures Pipeline, P-parallèle DWPT et IDWPT proposées impactent directement la vitesse de traitement des données. Les tableaux 6,7 et 8 présentent les résultats de

synthèse de la mise en œuvre de l'architecture DWPT 4, 8 et 16 parallèles en noir ainsi que l'architecture IDWPT en bleu.

Paramètres de conception (Profondeur, ordre de filtrage, et de quantification)	Fréquence d'horloge (MHz)		Utilisation des ressources (I_e, I_r)	
	DWPT	IDWPT	DWPT	IDWPT
(2, 2, 5)	210.36	197.47	(3668, 652)	(389,668)
(3, 2, 5)	209.23	195.35	(6019, 960)	(573,1096)
(4, 2, 5)	209.02	194.97	(8655, 1243)	(742,1576)
(2, 4, 5)	181.83	147.54	(5991, 1689)	(1091,1008)
(3, 4, 5)	178.58	142.31	(8380, 2363)	(1410,1526)
(4, 4, 5)	178.37	141.98	(11181, 2601)	(1552,2036)
(2, 16, 5)	169.1	127.6	(30012, 4881)	(5894,3048)
(3, 16, 5)	167.28	124.88	(37172, 6575)	(7300,4106)
(4, 16, 5)	167.43	125.09	(38374, 7680)	(7536,4796)
(2, 2, 16)	106.07	125.25	(11116, 3395)	(2183,2120)
(3, 2,16)	105.11	123.02	(17679, 4330)	(2704,3472)
(4, 2,16)	104.98	122.71	(25389, 4830)	(3016,4986)
(2, 4,16)	91.2	92.6	(31336, 5137)	(6154,3208)
(3, 4,16)	90.55	91.29	(39361, 7764)	(7730,4848)
(4, 4,16)	91.85	93.93	(42687, 10342)	(8383,6458)
(2, 16,16)	86.43	83.17	(26408, 15572)	(30619,9736)
(3, 16,16)	86.57	83.44	(33859, 20959)	(39257,13104)
(4, 16,16)	85.9	82.16	(36348, 24456)	(42143,15290)

Tableau 8 Résultats d'implémentation des architectures 16-parallèle DWPT et IDWPT

Durant les simulations, nous avons observé que la fréquence d'horloge est d'environ 200 MHz et une quantification d'ordre 5 et d'environ 100 MHz et une quantification d'ordre 16 avec un degré de parallélisme différent dû à une faible latence dans notre architecture. Donc, l'architecture sera capable de traiter des données des Giga échantillons en cycle d'horloge sans avoir besoin de mémoire ou de blocs DSP.

IV. Architecture de pipeline-parallèle pour DWPT/IDWPT

Nous avons également utilisé ici la même structure des bancs de filtres FIR modifiés P-parallèle. Ces filtres ont montré une grande régularité dans l'architecture DWPT P-parallèle et IDWPT P-parallèle. Cependant, nous avons implémenté l'architecture P-parallèle des transformées DWPT et IDWPT en même temps, où le choix de la transformation directe ou inverse de DWPT devient juste un paramètre comme le montre la figure 42.

L'architecture respecte les points suivants :

- Générique
- Une architecture reconfigurable au niveau de la profondeur, de l'ordre des filtres, de l'ordre de quantification, du degré de parallélisme ainsi que la sélection du DWPT ou IDWPT à mis en œuvre.
- Garantir un débit ultra élevé
- Réduire le coût de conception des architectures en utilisant la moitié du filtre FIR modifié en parallèle P, dont nous chargeons les coefficients après synthèse.

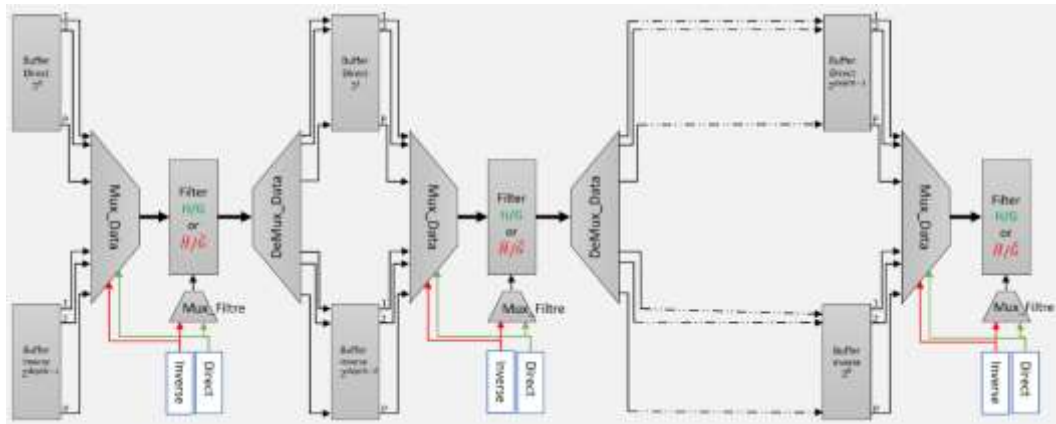


Figure 42 Proposition de chemin de données p-parallèle DWPT et IDWPT

Il est important de noter que nous utilisons les blocs Buffer similaires qui ont été présentés dans la partie précédente dans le DWPT P-parallèle et le IDWPT P-parallèle. Les blocs Mux_Data et DeMux_Data sont implémentés pour gérer les données entre les différents buffers et le filtre FIR partagé P-parallèle. Le chargement des coefficients des filtres FIR après synthèse et la gestion de la direction de la transformation sont assurés par les blocs Mux_Filtre.

Paramètres de conception (profondeur, quantification de l'ordre)	Utilisation des ressources du FIR ()		
	P=4	P=8	P=16
(2, 2, 5)	(41,27)	(128,64)	(298,106)
(3, 2, 5)	(41,28)	(138,67)	(315,110)
(4, 2, 5)	(49,30)	(138,70)	(315,113)
(2, 4, 5)	(53,37)	(148,83)	(371,127)
(3, 4, 5)	(53,38)	(167,86)	(371,131)
(4, 4, 5)	(61,40)	(167,89)	(371,135)
(2, 16, 5)	(112,94)	(281,189)	(701,319)
(3, 16, 5)	(112,96)	(298,195)	(701,322)
(4, 16, 5)	(119,98)	(307,195)	(701,327)
(2, 2, 16)	(198,83)	(302,107)	(368,161)
(3, 2,16)	(198,88)	(328,112)	(368,166)
(4, 2,16)	(218,93)	(353,117)	(368,172)
(2, 4,16)	(257,114)	(378,138)	(431,337)
(3, 4,16)	(257,119)	(428,143)	(431,198)
(4, 4,16)	(297,124)	(428,148)	(431,203)
(2, 16,16)	(557,278)	(760,314)	(1164,408)
(3, 16,16)	(557,283)	(806,319)	(1164,408)
(4, 16,16)	(593,288)	(806,324)	(1164,413)

Tableau 9 Résultats d'implémentation de l'architecture parallèle du filtre FIR

Les résultats de la synthèse des filtres FIR parallèles P sont présentés dans le tableau 8 qui présente la zone de consommation avec différents degrés de parallélisme, la profondeur de l'arbre, l'ordre des filtres et la quantification des coefficients (en nombre de bits). Nous remarquons qu'en utilisant un filtre FIR modifié P-parallèle partagé, les ressources nécessaires ont été réduites de 3% à 5% pour une profondeur = 4 et un ordre de filtrage = 16, ce qui est très significatif surtout avec la grande profondeur et l'ordre de filtrage élevé (comme l'ondelette de Meyer discrète).

V. Architecture lifting-scheme en pipeline avec partage des ressources

Pour certains domaines d'application à faible puissance, l'implémentation du DWPT nécessite plus de blocs multiplicateurs et additionneurs ainsi qu'une grande quantité de mémoire de stockage. C'est dans

ce cadre que nous proposons aussi une version légère. Il s'agit d'un DWPT de deuxième génération basée sur l'approche lifting-scheme.

La principale caractéristique de l'approche lifting-scheme est la décomposition des filtres à ondelettes passe-haut et passe-bas en une séquence de filtres plus petits. Le lifting-scheme nécessite moins de calculs de convolution que la première génération du DWPT. Par conséquent, nous réduisons la complexité de la conception à presque en moitié en conservant la même vitesse de traitement des données. Cette transformation est essentiellement constituée de trois étapes, qui sont respectivement appelées division, élévation et mise à l'échelle, comme le montre la figure 43.

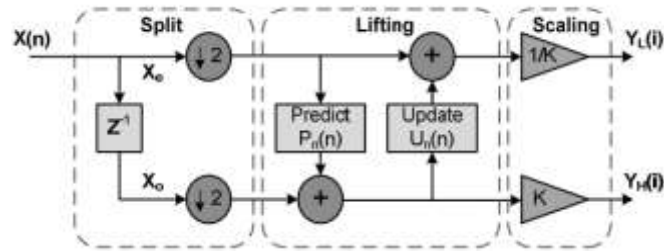


Figure 43 Implémentation de l'architecture DWPT lifting-scheme [MAN09]

Tout d'abord, le signal d'entrée sera divisé en sous-séquences d'index paires et impaires. Cette sous-séquence porte le nom du pas d'ondelette ou le pas de mise à l'échelle. Ensuite, la valeur du sous-signal impair et pair obtenu sera modifiée en utilisant des étapes de prédiction et de mise à jour alternées, appelé l'élévation double et primaire.

L'algorithme du lifting-scheme est décrit comme suit :

- Étape fractionnée : Le signal d'origine, $X(n)$, est divisé en échantillons pairs et impairs.
- Étape d'élévation : Cette étape est exécutée en N sous-étapes (selon le type de filtre), où les échantillons pairs et impairs sont filtrés par les filtres de prédiction et de mise à jour, $P_n(n)$ et $U_n(n)$.
- Étape de normalisation ou de mise à l'échelle : Après N étapes de levée, un coefficient d'échelle k et $1/k$ sont appliqués respectivement aux échantillons impairs et pairs afin d'obtenir la bande passe-bas ($Y_L(i)$), et la sous-bande passe-haut ($Y_H(i)$).

Nous rappelons, que nous avons utilisé le concept de linéarisation dans l'arbre DWPT du lifting-scheme classique qui a modifié l'architecture du flux de données comme le montre la figure 42. Cette figure illustre une nouvelle approche de lifting-scheme rapide du DWPT basée sur une nouvelle transformation en ondelettes lifting-scheme linéaire modifié qui assure une conception rapide et peu coûteuse avec des accès sans mémoire.



Figure 44 Schéma du cheminement des données lifting-scheme modifié de l'architecture DWPT

Le filtre unique modifié (P/U Filter Block) peut traiter la même quantité de données à l'étape k de l'arbre original. La structure du filtre P/U modifié est présentée à la figure 45.

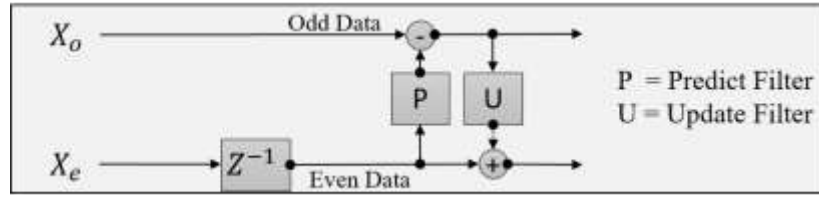


Figure 45 Structure des filtres P/U à l'étape k

Où les filtres P/U offrent la même fonctionnalité que celle présentée par Mallat dans leur arbre binaire où il peut traiter deux échantillons dans chaque cycle d'horloge.

Par conséquent, ce bloc modifié peut traiter un échantillon dans deux cycles d'horloge. Pour assurer le meilleur entrelacement et la meilleure gestion des données à différentes étapes, nous avons développé un bloc clé dans tout notre modèle qui est le "Buffer Block", qui est situé entre les filtres à différents niveaux avec un signal spécifique Enable $E/\bar{O}$ pour contrôler la fonction de multiplexeur (Mux) (contrôle du suivi des données paires et impaires entre les différents niveaux de l'arbre). Le nombre de tampons dans chaque niveau dépend de la profondeur qui est égale à $2^{profondeur}$.

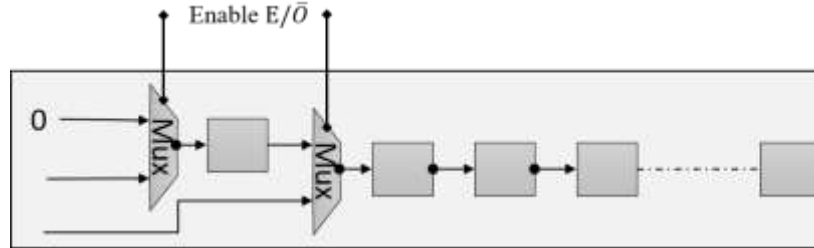


Figure 46 Structure de buffer dans l'étage k

VI. Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons développé une architecture matérielle efficace et innovante pour les DWPT / IDWPT de première et deuxième génération, offrant un très haut débit et une conception et implémentation à faible coût. Le chemin de données efficace maintient un chemin critique court, ce qui permet d'atteindre une fréquence de fonctionnement élevée. Les architectures DWPT / IDWPT proposées sont génériques, modélisées en VHDL au niveau RTL, étant entièrement reconfigurables à la synthèse en ce qui concerne l'ordre de transformation des ondelettes (profondeur de l'arbre), l'ordre des filtres, la quantification des coefficients de filtrage et le niveau de parallélisme. En outre, ils sont reconfigurables en cours d'exploitation, permettant aux valeurs des coefficients des filtres de se charger dynamiquement en cours d'exécution, ce qui offre une grande souplesse opérationnelle ainsi qu'une adaptabilité au domaine d'application, contrairement aux travaux de la littérature.

Partie 3

Traitement intelligent de données

Chapitres 3.1 Diagnostic automatisé

I. Introduction

En 2016, l'Organisation mondiale de la santé (OMS) a déclaré un nombre de décès estimé à 17,9 millions, ce qui représente 31 % mondialement, dont 85 % sont dus à des crises cardiaques et des accidents vasculaires cérébraux. Plus des trois quarts des décès enregistrés ont lieu dans les pays à faibles et moyens revenus [WOR]. Dans le rapport [BEN17], il a été constaté que l'hypertension artérielle et le cholestérol, le diabète, le syndrome métabolique et les maladies rénales, représentent les facteurs de risque majeurs qui entraînent des complications très graves à l'origine des maladies cardiovasculaires.

Le travail dans cet axe a débuté en concertation avec l'équipe ASC-LGIPM de l'Université de Lorraine. L'étude préliminaire a fait l'objet de la thèse de K. Karboub (boursier de la fondation, thèse en cotutelle avec UL et UH2), et a donné lieu à des publications [KAR191, KAR192, KAR193, KAR194]. Nous visons dans les travaux de cet axe la fiabilité dans la collecte, le traitement et l'analyse des données dans les pathologies extrêmement délicates : cardiovasculaires. Je me focalise dans ce chapitre sur le traitement des données pour un diagnostic automatisé, prenant en compte la précision, l'impact d'une mauvaise classification et la durée d'exécution de chaque modèle afin de construire un système fiable de diagnostic.

Les maladies cardiovasculaires sont un groupe de troubles causés par un fonctionnement électrique, musculaire ou vasculaire anormal. Cette anomalie peut être directement causée par l'hypertension, l'athérosclérose, les maladies des artères coronaires, le diabète, la cardiopathie valvulaire, la cardiomyopathie dilatée, la cardiomyopathie hypertrophique ou la cardiomyopathie restrictive. Elles peuvent également être la conséquence indirecte d'une mauvaise alimentation, d'une utilisation excessive d'aliments transformés, de l'obésité, du stress, d'une mauvaise hygiène et d'une activité physique insuffisante. Les causes énumérées peuvent entraîner différents niveaux de complications allant de légères infections à des crises cardiaques entraînant la mort.

Pour une meilleure analyse cette anomalie, il est nécessaire d'étudier le comportement du signal ECG (électrocardiogramme). Ce dernier est un signal temps-tension « P-QRS-T » qui fournit l'activité électrique périodique du cœur. Les signaux ECG sont les méthodes non invasives les plus courantes pour le diagnostic des maladies cardiovasculaires. L'onde "P" correspond à la contraction auriculaire, et le complexe "QRS" à la contraction des ventricules. Le complexe "QRS" est beaucoup plus important que l'onde "P" en raison de la différence relative de masse musculaire des oreillettes et des ventricules, qui masque la relaxation des oreillettes. Quant à la relaxation des ventricules, il peut être observé sous la forme de l'onde "T" (figure 47). Pour la représentation temps-fréquence, l'utilisation de méthodes d'extraction des caractéristiques du domaine temporel ne fournit pas une excellente précision pour le diagnostic de la santé cardiaque. Pour se faire, de nombreuses études sont menées ce qui le diagnostic automatisé des anomalies cardiaques à l'aide des signaux de l'ECG. Dans [LIA16], les auteurs ont combiné l'analyse des composantes indépendantes du noyau dans l'extraction des caractéristiques non linéaires et la Transformée en Ondelettes Discrètes (DWT) pour l'extraction du domaine fréquentiel.

Dans ce travail, les auteurs ont utilisé SVM (Support Vector Machine) comme classificateur optimisé à l'aide d'un algorithme génétique. Ce modèle a utilisé la base de données « Arrhythmia MIT » et a atteint une précision de 97,3 %. Les auteurs dans [UBE08 et UBE09] ont utilisé un vecteur propre pour extraire les caractéristiques de quatre classes de signaux ECG à savoir : rythme sinusal normal, insuffisance cardiaque congestive, fibrillation auriculaire et tachycardie ventriculaire. Les caractéristiques extraites ont été classées basant sur réseau neural récurrent (RNN), avec une précision de 98,06% et (SVM) qui pour une précision de 98,33%. Dans [LI16], ils ont utilisé l'entropie des paquets d'ondelettes pour décomposer les signaux ECG, avec une entropie calculée à partir des coefficients décomposés en tant que caractéristiques représentatives, puis ils ont utilisé (Random Forest) pour classer les caractéristiques extraites. Le modèle proposé a atteint une précision de 94,61%. Dans [MIS10], les chercheurs ont utilisé « Local Fractal Dimension » comme méthode d'extraction des caractéristiques et KNN (K-Nearest Neighbours) comme classificateur. Ils ont obtenu une précision de 99,49%. Dans [KHO10], ils ont comparé l'impact de différentes méthodes d'extraction de caractéristiques DWT, Transformée en ondelettes continues (CWT) et Transformée en cosinus discrète (DCT) et de classificateurs, à savoir SVM et Perceptron multicouche.

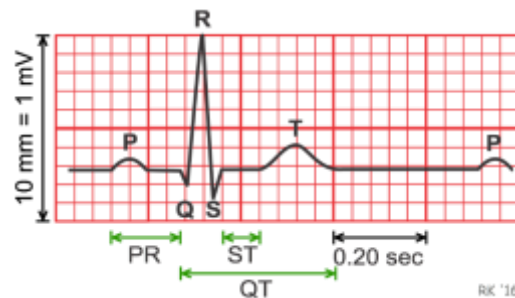


Figure 47 Forme du signal ECG

La plupart des modèles existants sont testés en utilisant la même taille de données et évalués en fonction de leur précision et, dans certains cas, des normes AAMI (Association for the Advancements of Medical Instrumentation). L'idée des travaux de ce chapitre, est de comparer les performances de nombreuses techniques de transformation non linéaire dans le domaine, à savoir : la DWT, la CWT, le modèle autorégressif (MA) et la MODWT (Maximal Overlap DWT) avec l'entropie de Shannon (SE). Le choix d'utiliser le MODWT sur la base des valeurs SE s'est basé sur quelques travaux qui ont démontré l'efficacité de cette technique [LI16, MIS10, KHO10, QIB05, DES15, DAS13 et KHA13]. Les caractéristiques représentatives sont ensuite utilisées comme données d'entrée pour différents classificateurs, à savoir CNN (Convolutional Neural Network), SVM, KNN, et les analyses discriminantes quadratique (ADQ) et de Naïve Bayésienne (NB). Les résultats sont évalués par le biais des : coût des erreurs de classification, de l'intervalle de confiance, de la durée d'exécution et de la précision globale de la classification. L'objectif principal est de se focaliser sur l'utilisation des méthodes les plus utilisées concernant l'extraction de caractéristiques à partir de différents signaux physiologiques non stationnaires [GAR98 et LIU07]. La nature très sensible des changements morphologiques des indicateurs de santé humaine a rendu nécessaire la fusion de nombreuses méthodes d'extraction de caractéristiques obligatoire afin de compléter, décomposer et représenter au mieux chaque information.

II. Démarche et outils

1. Modèle proposé

Il est difficile d'identifier les maladies cardiaques en raison de plusieurs facteurs contributifs concernant les patients, le personnel médical ou le matériel médical utilisé pour le diagnostic (représentant l'étape la plus importante pour un meilleur traitement). Il s'agit de la méthode la plus couramment utilisée pour diagnostiquer les patients souffrant d'anomalies cardiovasculaires. L'évaluation couramment pratiquée par les médecins peut être parfois subjective, longue et liée à l'observation. Cette subjectivité est plus critique en raison de la double signification des signaux ECG enregistrés, principalement la fréquence et la durée. Donc, nous présentons une étude comparative dans laquelle nous utilisons différentes approches de traitement et analyse des données comme un outil très pertinent pour aider et améliorer la précision du diagnostic des maladies cardiovasculaires. Ces modèles sont formés sur les bases des données d'arythmie et de sinus à rythme normal de la base de données MIT-BIH disponibles en ligne, et sur la base de données d'insuffisance cardiaque congestive du BIDMC [MOO01, GOL03 et BAIM86]. Ces modèles sont testés sur la base des données que nous avons collectées, consistant en plus de 72000 échantillons enregistrés en fonction de patients souffrant des mêmes pathologies. Les signaux ECG anormaux sont jugés anormaux par comparaison avec les battements cardiaques normaux. L'approche est illustrée dans la figure 48.

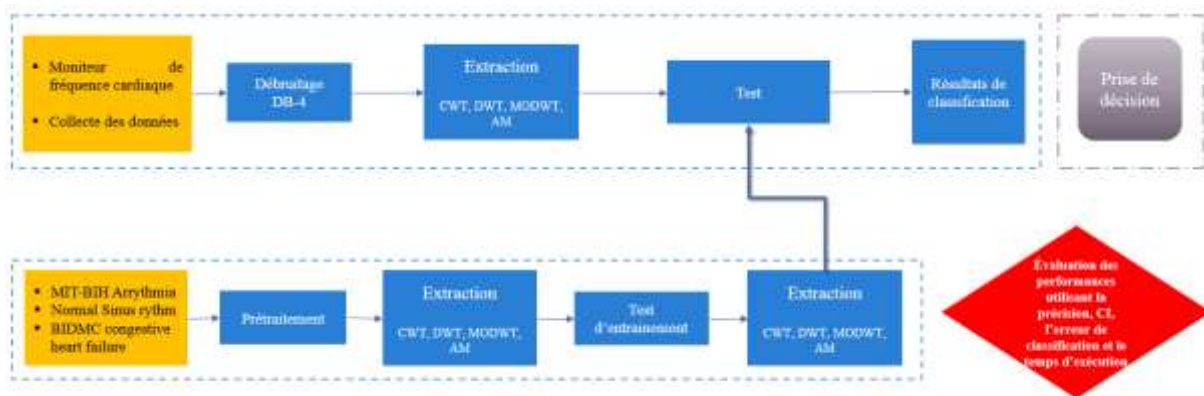


Figure 48 l'approche développée

L'idée consiste à tester et à évaluer les performances de la SVM, CNN, KNN, ADQ et NB comme classificateurs pour classer correctement et efficacement les données nouvellement non étiquetées. En outre, la méthodologie comprend CWT, DWT, MODWT, et AM comme techniques d'extraction de caractéristiques. Nous avons testé les méthodes déjà citées avec l'analyse en composantes principales (ACP), pour évaluer l'influence de la réduction de la dimensionnalité sur la précision globale, et les mesures de la durée d'exécution. La cohérence des performances est évaluée en utilisant la précision globale avec l'intervalle de confiance (IC), le coût des erreurs de classification et la durée d'exécution. L'étude a abouti à une précision globale de 99,92 % avec un IC de 99,07-100 % et de 98,63 % avec un IC de 95,1-100 % en utilisant respectivement ADQ et le KNN, tous les deux avec un niveau de certitude de 99 %. L'approche développée est robuste et précise, et peut être implémentée en toute sécurité pour le diagnostic automatisé des maladies cardiovasculaires.

2. Extraction des données

L'une des difficultés qui rend l'extraction des données ECG difficile est que ces signaux sont de nature non linéaires et non stationnaires. La non stationnaire de ces signaux peut être facilement observée lors d'une activité physique et mentale, de changements dans l'état psychologique et de tout autre facteur connexe, comme les changements dans les niveaux de pression sanguine, le diabète et autres [POU13 et ELH16]. En conséquence, de nombreuses approches non linéaires ont été présentées et utilisées dans plusieurs références telles que les ondelettes, les séries de Fourier et autres [ABD19]. Dans notre cas, les caractéristiques sont extraites indépendamment en utilisant quatre techniques différentes : CWT, DWT, AM et MODWT.

L'analyse par ondelettes est une technique temps-fréquence qui utilise, contrairement aux séries de Fourier, des fenêtres de taille variable. L'élément fondamental de la fonction élémentaire appelée ondelette. Les fonctions d'ondelettes peuvent être définies comme des fonctions de translation-dilatation. Les différentes ondelettes sont dérivées de la fonction ondelette mère. Ces ondelettes peuvent être divisées en deux types : CWT et DWT.

La CWT est définie par :

$$CWT(a, b) = \frac{1}{\sqrt{a}} \int_{-\infty}^{+\infty} \varphi\left(\frac{t-b}{a}\right) * x(t) dt; a \in R^+ \setminus \{0\} \text{ and } b \in R \quad (14)$$

Où φ est la fonction de base, a est le paramètre d'échelle, b est le paramètre de décalage et $x(t)$ est le signal analysé.

La DWT fonctionne comme un filtre passe-bande où le signal est filtré sur plusieurs niveaux. À chaque niveau, le signal est décomposé en coefficients d'approximation et en coefficients de détail. Il est défini comme suit :

$$DWT(a, b) = \frac{1}{\sqrt{a}} \int_{-\infty}^{+\infty} \varphi\left(\frac{t-b}{a}\right) * x(t) dt; a = 2^j, b = k * 2^j \text{ where } (k, j) \in Z^2 \quad (15)$$

Tout comme la DWT, la MODWT est une transformation par filtrage linéaire de séries en coefficients liés aux variations sur un ensemble d'échelles. Le MODWT offre de nombreux avantages par rapport au DWT. Il s'agit d'un outil hautement redondant et non orthogonal. Il stocke toutes les valeurs d'échantillonnage descendant de chaque décomposition de tous les niveaux. Cela facilite l'alignement de l'ondelette décomposée. Comme le processus de calcul des coefficients génère une énorme quantité de données, le calcul de l'incertitude du contenu des informations aide à choisir les caractéristiques de haut niveau. L'entropie est un outil largement utilisé à cette fin. Dans notre étude, nous avons utilisé l'entropie de Shannon (SE) qui peut s'écrire mathématiquement comme :

$$SE_j = - \sum_{k=1}^N p_{j,k} * \log p_{j,k} \quad (16)$$

Où N est le nombre de coefficients correspondants dans le $j^{\text{ème}}$ nœud et $p_{j,k}$ sont les carrés normalisés des coefficients des paquets d'ondelettes dans le $j^{\text{ème}}$ nœud terminal.

Alors, le terme autorégressif signifie qu'une variable est en régression sur elle-même. En d'autres termes, nous prédisons la valeur d'une variable bien définie en effectuant une régression linéaire des valeurs précédentes de la même variable. Mathématiquement, cela peut s'écrire comme suit :

$$Y_t = c + \phi_1 * Y_{t-1} + \phi_2 * Y_{t-2} + \dots + \phi_p * Y_{t-p} + \varepsilon_T \quad (17)$$

Où p désigne l'ordre de l'auto-régression et ε_T désigne le bruit blanc. Dans notre étude, nous avons utilisé l'AM d'ordre 4 et la méthode de Burg pour estimer les coefficients de l'AM pour chaque fenêtre.

Pour comparer les performances de ces techniques d'extraction de caractéristiques, nous utilisons l'analyse en composantes principales (ACP) qui est une technique de réduction de la dimensionnalité qui utilise la transformation orthogonale pour convertir un ensemble d'observations de variables éventuellement corrélées en un ensemble de variables linéairement non corrélées appelées composantes principales [AIT17]. Cette technique met en évidence les similitudes et les différences de l'ensemble de données. Dans notre cas des signaux ECG, nous avons calculé l'ACP en suivant ces étapes :

- Calcul de la matrice de covariance
- Calcul de la valeur propre et du vecteur propre,
- Classement dans l'ordre décroissant des orientations des valeurs propres et projection des données originales des signaux ECG dans les directions des vecteurs propres classés.

À la fin de ce processus, 46 composants principaux ont été conservés à partir des 72 composants originaux et ont été alimentés séparément aux classificateurs.

3. Les outils de classification

L'objectif de l'utilisation de l'apprentissage supervisé dans la classification des signaux ECG est de construire un modèle robuste de distribution des étiquettes de classe en fonction de caractéristiques prédictives données, à savoir les enregistrements ECG prétraités. Le classificateur qui en résulte est ensuite utilisé pour attribuer des étiquettes de classe aux données nouvellement collectées lorsque les prédicteurs sont connus mais que la valeur de l'étiquette de classe est inconnue. Je présente ici un bref aperçu sur les classificateurs utilisés.

A. SVM

SVM est un classificateur discriminant formellement défini par un hyperplan de séparation. Ainsi, en utilisant des données d'entraînement étiquetées, les SVM peuvent produire un hyperplan qui catégorise les nouvelles données non étiquetées. Alors, un ensemble d'apprentissage $(y_i; x_i); i=1,2,\dots, n$ où $x_i \in \mathbb{R}^n$ représente le $i^{\text{ème}}$ vecteur et $y_i \in \mathbb{R}$, représentant l'élément cible. De nombreux types de SVM ont été développés pour s'adapter à différents types et surtout à la complexité des problèmes. Le SVM linéaire, utilisé dans cette étude, produit l'hyperplan optimal suivant la forme :

$$f(x) = w^T * x + b \quad (18-1)$$

Où w est un vecteur de coefficient dimensionnel et b est un décalage. Cela peut être fait en minimisant la fonction d'erreur telle qu'elle est exprimée dans l'équation suivante :

$$\text{Min}_{w,b,\xi} : \frac{1}{2} * w^2 + C \sum_{i=1}^n \xi_i \quad (18-2)$$

Avec : $y_i(w^T * x_i + b) \geq 1 - \xi_i; \xi \geq 0; f$ ou chaque $i = 1, 2, \dots, n$

Les modèles SVM peuvent être utilisés avec différents noyaux, à savoir linéaire, polynomial, fonction de base radiale et sigmoïde. La fonction du noyau est un produit ponctuel de points de données d'entrée

cartographiés dans un espace de caractéristiques à dimension supérieure par transformation ξ [GE19]. Différents types de modèles SVM ont prouvé leur efficacité dans le domaine médical.

B. CNN

D'autre part, le CNN est l'une des structures de réseau neuronal les plus utilisées. Basé sur le perceptron multicouche (MLP). Il s'agit d'un réseau de neurones de type Feed Forward avec calcul de structure profonde et de convolution. Le CNN est caractérisé par une excellente performance dans l'apprentissage des caractéristiques implicites. En outre, les échantillons peuvent être introduits directement dans le réseau sans traitement compliqué ni extraction de caractéristiques. Il est composé de trois types différents de couches de base : la couche de convolution, la couche d'interrogation et la couche entièrement connectée [SCH15].

- Couche de convolution : La couche de convolution est la couche opérationnelle centrale du réseau CNN. Cette couche apprend des caractéristiques à partir des échantillons entrés. Les opérations de convolution sont effectuées entre les échantillons d'entrée et les noyaux. Les résultats de la convolution sont ensuite décalés et font l'objet d'une transformation non linéaire.
- Couche de mise en commun : La couche de mise en commun est également appelée couche de sous-échantillonnage. Cette couche permet de réduire davantage la taille des données en échantillonnant les données d'entrée dans différentes dimensions. De plus, la généralisation du réseau est améliorée car la couche de mise en commun est invariante contre les transformations linéaires locales des données d'entrée.
- Couche entièrement connectée : Après avoir été traitées par plusieurs couches de convolution et de mise en commun, les caractéristiques implicites sont apprises par le réseau. La dimension des données a été suffisamment réduite pour qu'elles puissent être traitées avec un réseau de Feed Forward. La couche entièrement connectée est équivalente au perceptron multicouche (MLP) traditionnel.

C. ADQ

Dans ADQ, on suppose que les fonctions de densité de probabilité (PDF) conditionnelles à la classe, $P(x|c_i)$, se présentent sous la forme de distributions normales (gaussiennes) multivariées à d dimensions [DUD01].

$$P(x|c_i) = \frac{1}{(2\pi)^{d/2} |\Sigma_i|^{1/2}} \exp \left[-\frac{1}{2} (x - m_i)^T \Sigma_i^{-1} (x - m_i) \right] \quad (19)$$

Où i est l'indice de classe, m_i est le vecteur moyen d-par-1 et Σ_i est la matrice de covariance d-par-d pour la classe i et le $||$ est le déterminant. Contrairement à l'analyse discriminante linéaire, dans l'analyse discriminante quadratique, les matrices de covariance des classes ne sont pas supposées être égales.

D. KNN

Contrairement au K-Means, le KNN est une technique d'apprentissage supervisé utilisée pour la classification. Le K représente le nombre de voisins les plus proches utilisés pour classer ou prédire un échantillon d'essai. Connue pour ses performances robustes, le KNN a été utilisé dans de nombreuses applications, notamment dans le domaine médical [SAI13]. Ce classificateur repose nécessairement sur une fonction, de distance entre les modèles, qui est dans la plupart des cas la distance euclidienne. Basant sur la littérature, il est clairement prouvé que la précision de KNN dépend fortement de la valeur K et du type de métrique utilisé. Des valeurs K plus élevées réduisent l'influence du bruit sur les sorties du modèle, mais elles rendent également moins précise la distinction entre les différentes classes. Dans notre cas, nous avons testé quatre valeurs de K (1, 3, 5 et 7), utilisant la distance euclidienne décrite par la fonction suivante :

$$d_{st} = \sqrt{\sum_{j=1}^n (x_{sj} - y_{tj})^2} \quad (20)$$

Où $x_{sj} \in \mathbb{R}^n$ représente le $j^{\text{ème}}$ vecteur et $y_{tj} \in \mathbb{R}^n$ le cible.

E. Naïve Bayes

Le Naïve Bayésienne est un algorithme d'apprentissage machine probabiliste qui se base sur le théorème de Bayes développé par de Thomas Bayes (1702-1761) [JIA07]. Ce théorème peut-être exprimé comme la probabilité que A se produise étant donné que B s'est déjà produit.

En considérant $X = (x_1, \dots, x_n)$ comme les caractéristiques et Y comme la variable de classe. La spécificité de l'algorithme NB est qu'il considère que les caractéristiques sont indépendantes et que le fait de changer une caractéristique n'affecte aucune autre. Bien qu'il semble simple, NB s'est avéré être un classificateur efficace.

4. Les mesures de performances

Dans la plupart des cas, les algorithmes réagissent différemment en fonction de la taille des données d'entrée et de la technique d'extraction des caractéristiques. Cette différence affecte directement la performance de ces algorithmes [GRO96]. Dans plusieurs applications pratiques, il est évident que les dommages qui peuvent survenir à la suite de certaines décisions ne sont pas les mêmes que pour d'autres décisions. Pour décrire de manière adéquate l'effet et les exigences des modèles de classification dans des situations critiques, nous utilisons les coûts réels des erreurs de classification. Cet indicateur est sous forme de la somme d'une matrice de coûts de classe assignés. Dans ce travail nous avons utilisé la matrice simplifiée du tableau 10.

Nous avons également utilisé la classification globale et l'intervalle de confiance (IC) comme technique d'évaluation statistique des performances. Il faut noter que l'intervalle de confiance est différent de l'intervalle de tolérance et de l'intervalle de prévision. Il présente plutôt le niveau d'incertitude pour une variable donnée, dans notre cas, il s'agit bien de la précision de la classification. Pour calculer facilement l'IC, nous supposons que nous avons une distribution gaussienne de la proportion (car nous avons une grande taille d'échantillons). Dans ce cas, l'IC peut être calculé à l'aide de l'équation suivante :

$$\text{Radius (CI)} = z * \sqrt{\frac{\text{Accuracy} * (1 - \text{Accuracy})}{n}} \quad (21)$$

Où z est le nombre d'écarts types par rapport à la distribution gaussienne et n est la taille de l'échantillon [PRE09]. Le principal avantage de l'utilisation de l'IC dans notre étude est que nous arrivons à une limite supérieure et inférieure qui contient la véritable précision de la classification 99% du temps.

Prévision / Vérité	ARR	CHF	NSR
ARR	0	1	0.5
CHF	1	0	0.5
NSR	1	1	0

Tableau 10 Matrice de classifications

III. Discussions

1. Collecte des données

L'objectif principal est de tester différentes techniques d'extraction de caractéristiques et de classificateurs sur des données nouvellement collectées. Dans cette optique, douze non-fumeurs (soit neuf hommes et trois femmes) se sont portés volontaires pour participer à cette expérience. Six d'entre eux souffrent d'arythmie, une d'insuffisance congestive et cinq ont un rythme cardiaque normal. Personne d'entre eux ne souffre d'aucun type d'allergie ou d'autres maladies autres que les maladies cardiovasculaires, les femmes n'étaient pas enceintes et tous les participants étaient âgés de 45 à 60 ans. 24 heures avant l'enregistrement, nous avons demandé aux personnes volontaires de se reposer suffisamment, de s'abstenir de tout type d'exercice et de ne pas boire de stimulants tels que la caféine. Ils ont reçu une explication verbale sur l'expérience et sur l'utilisation qui en est faite. Nous avons équipé les volontaires avec un seul capteur ECG au plomb, comme le montre la figure 49. Le principal avantage de ce montage est sa simplicité et flexibilité, il peut être facilement connecté à n'importe quel type d'ordinateur portable et peut être utilisé à tout moment et en tout lieu. Le circuit est constitué d'un capteur AD8232 connecté à une carte d'acquisition à base de microcontrôleur. Les enregistrements durent 6 minutes et 13 secondes dans une chambre hermétique. Afin d'extraire la structure morphologique du battement de cœur, un nombre égal d'échantillons sont introduits dans le modèle. Nous avons conservé des enregistrements de 6 minutes, et avons segmenté chacun d'entre eux en 6 enregistrements de 1 minute chacun.

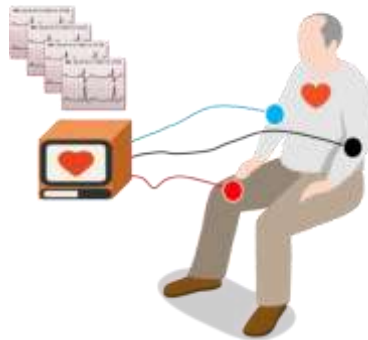


Figure 49 Collecte des données ECG basant sur Sparkfun-AD8232

Le capteur utilisé (Sparkfun-AD8232) est un bloc de conditionnement du signal intégré et une simple carte qui donne comme sortie un signal ECG analogique. L'AD8232 agit comme un amplificateur opérationnel permettant d'obtenir un signal plus clair. Il se compose de neuf connexions de la carte à tout dispositif ou carte de développement ou de visualisation.

Il y a trois fils principaux a pour objectif de mesurer la différence de potentiel électrique entre les bras et les jambes [ACQ19]. Dans cette démonstration, nous avons examiné l'un des fils des membres et enregistré la différence de potentiel électrique entre deux bras. L'électrode connectée à la jambe droite est considérée comme le nœud de masse. Un signal ECG sera acquis à l'aide d'un amplificateur de potentiel biologique, puis affiché à l'aide du logiciel « *Processing 2.2.0* », où un contrôle de gain sera créé pour ajuster son amplitude. Vers la fin, l'ECG enregistré sera analysé.

Le signal détecté représente non seulement des signaux extrêmement faibles allant de 0,5 mV à 5,0 mV, mais aussi une composante continue allant jusqu'à ± 300 mV (résultant du contact entre l'électrode et la peau) et une composante en mode commun allant jusqu'à 1,5 V, qui résulte du potentiel entre les électrodes et la terre. La largeur de bande utile d'un signal ECG dépend de l'application et peut varier de 0,5 à 100 Hz, atteignant parfois jusqu'à 1 kHz. Elle est généralement d'environ 1 mV crête à crête en présence d'un bruit externe de haute fréquence beaucoup plus important, d'interférences à 50 ou 60 Hz et d'un potentiel de décalage des électrodes en courant continu. Les autres sources de bruit comprennent les mouvements qui affectent l'interface peau-électrodes, les contractions musculaires ou les pics d'électromyographie, la respiration (qui peut être rythmique ou sporadique), les interférences électromagnétiques (EMI) et le bruit d'autres appareils électroniques qui se couplent à l'entrée.

2. Traitement des données

Basant sur l'activation musculaire, les signaux ECG sont très bruyants. Plus les capteurs sont éloignés du cœur plus ils mesurent le bruit musculaire, et moins nos modèles progressent dans l'apprentissage. Malgré la capacité de l'AD8232 à agir comme un amplificateur opérationnel, l'ensemble des données des signaux ECG recueillis présente un enregistrement bruyant. Nous considérons le signal mesuré comme la somme du signal ECG réel et des bruits associés qui peuvent être représentés comme :

$$M_s = N_s + A_s \quad (22)$$

Où M_s est le signal mesuré, N_s les bruits et A_s le signal réel. Comme nous ne savons pas grand-chose sur les caractéristiques statistiques des bruits considérés, la meilleure solution consiste à utiliser des filtres qui ne nécessitent pas de détails supplémentaires sur le bruit. En raison de la nature non stationnaire des signaux ECG, et la forme temporelle du bruit, nous avons filtré nos données en utilisant une analyse multi-résolution (MRA) basée sur la DWT. Conscients de la difficulté et du temps que peut prendre le calcul des coefficients d'ondelettes pour toutes les configurations possibles afin de préparer les données à une classification plus précise, nous avons basé notre choix sur les travaux de Mallat [MAL99, SIN95]. Mallat a introduit dans ses travaux une application itérative de filtres passe-haut et passe-bas afin de calculer l'expansion en ondelettes des nombres discrets. Pour se faire, nous avons utilisé l'ondelette mère de Daubechies-db4. Comme les signaux enregistrés ne contiennent aucune valeur supérieure à 45 Hz, nous avons réglé les deux niveaux initiaux sur zéro et reconstruit les coefficients d'ondelettes restants pour les niveaux restants.

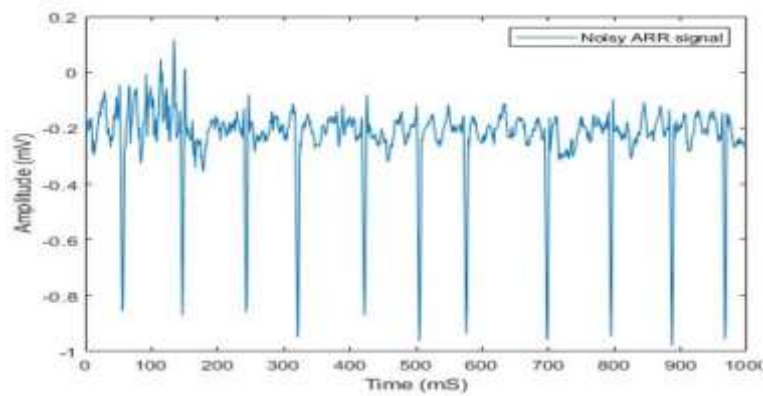


Figure 50 un échantillon du signal ARR bruyant enregistré

Comme le montre la figure 50, le bruit ne change pas la morphologie du signal, mais il influence l'intervalle ARR et les extrémités des ondes T, U et P, ce qui affecte négativement la précision du modèle. Cette forte dépendance a été prouvée par les travaux dans la littérature, portant sur les nouvelles techniques de filtrage et de classification et sur l'impact qu'un signal ECG bruyant peut avoir sur la précision et la nature ces modèles.

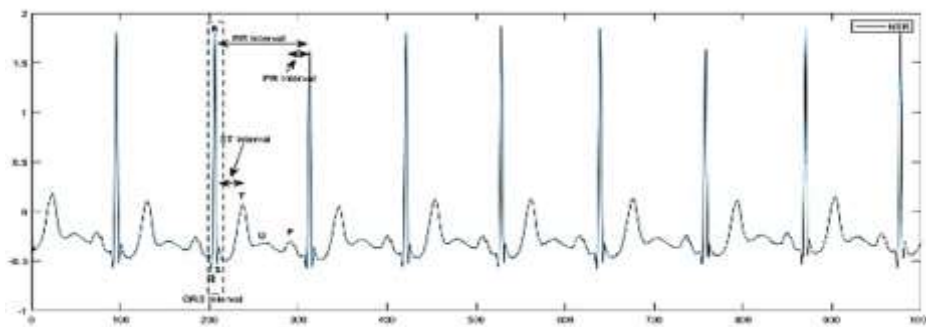
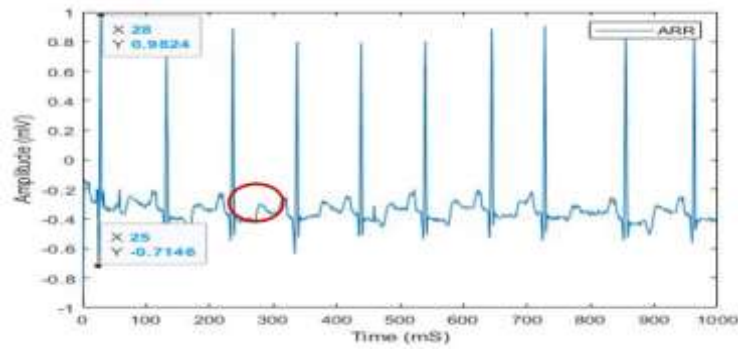


Figure 51 Forme du signal du rythme cardiaque normal

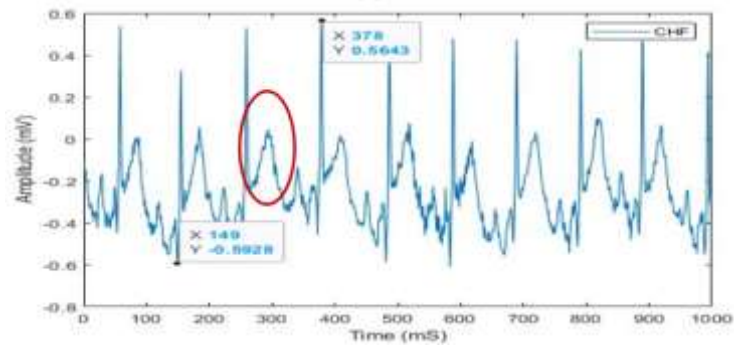
Dans un fonctionnement cardiaque normal, comme le montre la figure 51, la forme d'onde de l'ECG contient 6 ondes réparties en deux ondes, deux segments et un complexe. La première activité électrique du cœur, appelée intervalle PR, part de l'oreillette droite et provoque la dépolarisation de la chambre de l'oreillette, ce qui oblige le sang désoxygéné à sortir par les veines caves inférieure et supérieure dans le ventricule droit. Dans le complexe QRS, les deux ventricules commencent à pomper ; le ventricule droit pompe le sang désoxygéné dans les poumons pour l'oxygéner, et le ventricule gauche pompe le sang fraîchement oxygéné dans le reste du corps. Dans l'intervalle QT comprend le complexe QRS ou la dépolarisation des ventricules, le segment ST représente la partie isoélectrique de l'ECG et l'onde T où les ventricules cardiaques sont polarisés à nouveau pour démarrer un autre cycle de battements cardiaques.

Dans les enregistrements ECG, la repolarisation ventriculaire est un phénomène électrique complexe qui représente une étape cruciale dans l'activité électrique du cœur. Représentée par les ondes T et U, la repolarisation ventriculaire induit à un segment ST isoélectrique. L'onde T suit normalement l'orientation de l'onde R. Tout changement du segment ST, une diminution de l'amplitude de l'onde T et une augmentation de l'amplitude de l'onde U représente une manifestation de l'incidence accrue des arythmies, plus précisément de la tachycardie. Tandis qu'une élévation enregistrée du segment ST et une augmentation de l'amplitude de l'onde T proclament une occlusion de l'artère coronaire causant des dommages aux tissus cardiaques et entraînant une insuffisance cardiaque. Un tel phénomène se produit

lorsque le ventricule est au repos et donc repolarisé. Les figures 52.a et 52.b représentent respectivement la probabilité d'arythmie et l'insuffisance cardiaque congestive.



(a)



(b)

Figure 52 (a) Signal d'arythmie, (b) Signal d'insuffisance cardiaque congestive

L'analyse multi-fractale est utilisée pour analyser la dynamique d'un système lorsqu'un seul exposant n'est pas suffisant. A ce niveau, un spectre continu d'exposants est nécessaire. Le Holder condition est utilisé pour décrire la dimension fractionnaire d'un ensemble de points d'une fonction qui appartient au même exposant de support. Il peut être exprimé sur un espace euclidien à d dimensions, s'il y a $C, \alpha \in \mathbb{R}^+*$ comme : pour chaque x, y dans le domaine de la fonction :

$$|f(x) - f(y)| \leq C * \|x - y\|^\alpha \quad (23)$$

La figure 53 présente un test de la gamme des exposants de Holder dans le spectre de singularité ce qui concerne la première fenêtre utilisée dans l'analyse multi-fractale.

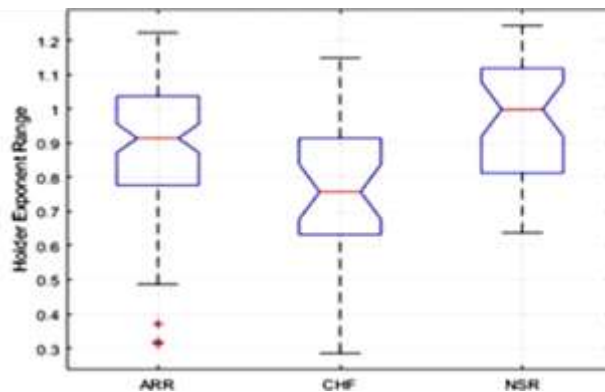


Figure 53 Gamme de spectre de singularité par groupe

Comme le montre la figure, l'exposant titulaire pour ARR est compris entre $[0,78 ; 1,04]$, pour CHF est une valeur comprise entre $[0,62 ; 0,91]$ et le rythme cardiaque normal $[0,8 ; 1,12]$ et a une valeur moyenne de $\alpha=1$, ce qui revient à l'équation (11) satisfaisant la condition de Lipchitz.

Comme les signaux ECG, ne sont pas stationnaires et ont des statistiques qui changent avec le temps, nous avons étudié la probabilité cumulative liée aux données collectées (figure 54).

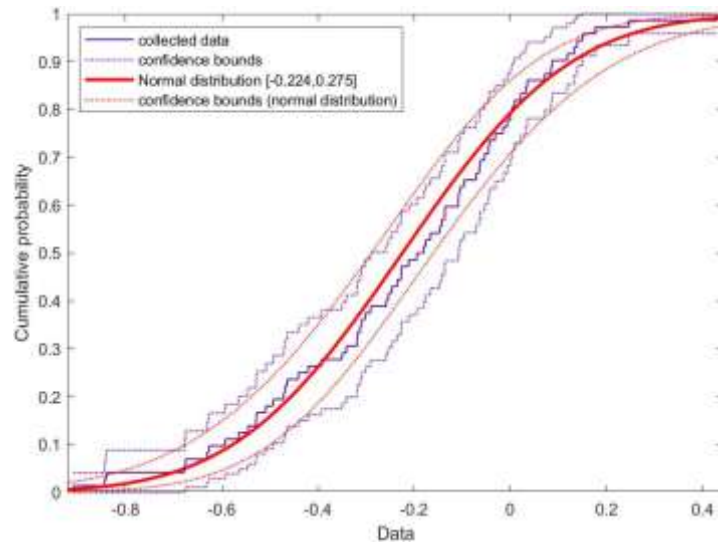


Figure 54 La probabilité cumulative des trois signaux ECG typiques

La figure montre que lorsque l'amplitude du signal est inférieure à -0,4 ou supérieure à -0,001, la probabilité cumulée des données recueillies est inférieure à l'ECG normal et lorsque l'amplitude est comprise entre $[-0,4, -0,001]$, la distribution de probabilité cumulée des données de test est inférieure à l'ECG normal. Dans les cas normaux et anormaux (ARR ou CHF), les points de mutation sont définis par un voisinage de -0,4 et 0.

3. Resultats

Malgré l'existence de nombreux domaines de transformation et de techniques de classification utilisés pour le traitement et la classification des signaux ECG, l'importance statistique de ces méthodes n'est pas évaluée. Comme montre le tableau 11, de nombreuses méthodes automatisées de classification des ECG ; analyse de fréquence, transformée en ondelettes, banques de filtres, modèle de Markov caché, SVM, ANN et autres ; ont démontré que la classification des ECG dépend fortement des caractéristiques extraites. Afin de choisir le meilleur système d'aide à la décision pour la classification de l'arythmie et de l'insuffisance cardiaque congestive, nous avons mené des expériences sur différentes techniques formées sur deux bases des données « MIT-BIH et BIDMC » et testé sur nos propres données non étiquetées collectées, composées de 72000 battements de cœur. A partir du tableau 11, nous pouvons remarquer que notre modèle a surpassé les modèles existants. Nous avons veillé à comparer : la dépendance du classificateur utilisé et les techniques d'extraction des caractéristiques. Les principales caractéristiques de cette contribution sont :

- Les signaux d'arythmie MIT-BIH, de rythme sinusal normal et d'insuffisance cardiaque congestive BIDMC sont utilisés comme ensembles de données d'entraînement et de validation.

- La performance de la stratégie proposée est évaluée à l'aide de différents indicateurs d'aspects, à savoir : la précision globale, l'IC, le coût moyen des erreurs de classification et la durée moyenne d'exécution.
- Les résultats obtenus sont robustes car nous avons utilisé notre propre ensemble de données collectées avec les mêmes pathologies précédemment nommées comme ensemble de données de test pour les modèles précédemment formés. Nous avons également utilisé une validation croisée en 5 et une ACP pour analyser le comportement et les changements de chaque modèle.

La méthode développée peut être utilisée pendant les périodes de débordement et de pénurie de ressources. Elle peut être utilisée dans les pays en développement où les résultats du diagnostic peuvent être envoyés à distance au cardiologue pour un contrôle supplémentaire ou comme outil de triage principal avec un IC.

Il est important d'ajouter que l'une des extensions les plus importantes de notre méthode consiste non seulement à fournir un modèle de haute précision, mais aussi à donner une visibilité sur le moment où le modèle est le plus susceptible d'échouer. C'est à ce moment que l'IC intervient, sur la base duquel un praticien peut décider de faire confiance ou non au résultat donné. D'un point de vue technique, un ensemble de données destiné à représenter les signaux du "monde réel" doit contenir la gamme la plus large possible de formes d'onde, y compris les cas ambigus, ce qui peut constituer le défi le plus intéressant et la limite technique de la méthode que nous proposons, car nous n'avons testé nos modèles que sur des échantillons de moins de 10 minutes enregistrés dans différentes plages de temps. C'est la principale différence entre nos données et les ensembles de données utilisés par le MIT. Les ensembles de données du MIT sont enregistrés à l'aide d'un dispositif de surveillance Holter qui permet de mieux surveiller les changements de signaux. Nous évaluons les résultats de notre étude d'un point de vue algorithmique et statistique. Pour chaque signal ECG enregistré et filtré, nous avons segmenté les données en six intervalles, une minute par intervalle. Nous avons appliqué les techniques CWT, DWT, MODWT et AM sur chaque segment des signaux enregistrés, qui sont au nombre de 72 segments, avec une comparaison des performances de plusieurs classificateurs : SVM, CNN, KNN, ADQ et BN.

Les signaux l'ECG sont transformés indépendamment en utilisant trois représentations de transformation CWT, DWT, MODWT et une représentation de régression AM. De plus, en utilisant l'ACP comme technique de réduction de la dimensionnalité, nous avons comparé les résultats donnés par les classificateurs testés en utilisant des données complètes et des données réduites. Comme le montre le tableau 12, la précision globale, la durée d'exécution et l'IC ont considérablement diminué tout en réduisant les données, tandis que le coût des erreurs de classification a augmenté. L'ADQ s'est montré plus performant que les autres modèles avec une précision globale très importante de 99,92 % avec un intervalle de confiance de 99,07 % à 100 %, 99 % du temps. Cela peut s'expliquer par les différences considérées dans les matrices de covariance des classes apparentées. L'approche de l'ADQ consiste à dériver une frontière de décision basée sur les combinaisons linéaires des caractéristiques qui séparent le mieux les classes données sans autre hypothèse de distribution gaussienne.

Alors que SVM et KNN sont compétitifs avec un coût de classification erronée de 7,5 et une durée d'exécution de 219,44 secondes respectivement. En utilisant la technique de réduction de la dimensionnalité, l'ACP, qui a conservé 63 % des données d'essai, a considérablement réduit les performances des MVC (CWT, DWT, AM), des discriminants quadratiques - DWT et des Naïve Bayes (DWT, MODWT, AM), tandis que KNN-MODWT a affiché les meilleures performances avec une précision de classification globale de 98,63 % et un IC de 95,1 % à 100 %, 99 % du temps et un coût de classification erronée de 9.

Travaux	Techniques d'extraction	Classificateur	Mesures d'évaluation	Base de données
[QUE18]	Voltage variation analysis	Screening methods	Sensitivity: 100% Specificity: 84.04% Accuracy: 92.85%	MIT-BIH arrhythmia
[XU18]	Raw ECG	Deep Neural Network (DNN)	Sensitivity: 97.68% Specificity: 99.89% Accuracy: 99.70%	MIT-BIH arrhythmia
[SAN18]	Temporal features extraction (pre-RR interval, post-RR interval, local average RR interval, global average RR interval).	DNN	Sensitivity: 99.48% Specificity: 99.83% Accuracy: 99.68%	MIT-BIH arrhythmia
[YIL18]	Convolution processing using 1D CNN	1D CNN	Accuracy: 91.33% Runtime: 0.015s per sample (54 seconds for 3600 used samples)	MIT-BIH arrhythmia
[TUN19]	DWT-1DHCP (1D hexadecimal local pattern) NCA (neighborhood component analysis)	1NN (1 nearest neighborhood with city block distance)	Accuracy: 99.7%	MIT-BIH arrhythmia
[CEL18]	CWT, DWT	SVM Adaboost ANN (Artificial NN) Naïve Bayes	Accuracy: 87.5% Accuracy: 93% Accuracy: 94% Accuracy: 99.7%	MIT-BIH arrhythmia
[VIS18]	Wavelet, Gabor, EMD (empirical mode decomposition), LPC(linear predictive coding)	Adaptive genetic-bat support vector NN	Accuracy: 98.65% Good put: 0.0590	MIT-BIH arrhythmia
[RAI18]	Daubechies wavelets	Multilayered probabilistic NN	Accuracy: 99.53% Runtime: 3 seconds!	MIT-BIH arrhythmia
[ALI14]	Autoregressive modelling	Logistics regression, KNN, MLP, Radial Basis Function Network (RBFN), SVM with Sequential Minimal Optimization (SMO)	Accuracy: 99.92%	MIT-BIH arrhythmia
[YEH10]	Wavelet transform	Type 2 fuzzy clustering	Accuracy: 99%	MIT-BIH arrhythmia
[PAT15]	tunable-Q wavelet transform (TQWT), PCA	Least squares support vector machine (LS-SVM)	Accuracy: 99.72%	Collected data from 20 subjects.
[DAV17]	Heart rate variability (HRV) with PCA	SVM	Accuracy: 99.2%, sensitivity: 98.43% specificity of 100%.	Collected from 80 subjects. The subjects were 46 men, aged 44–85 years, and 29 women, aged 23–87 years.
[SUD17]	Dual tree complex wavelet transform	KNN	Accuracy: 99.87%: Sensitivity: 99.69% Specificity: 99.95%	BIDMC, Fantasia and NSRDB
[OH18]	-	LSTM-CNN	98.10% accuracy, 97.50% sensitivity 98.70% specificity.	MIT-BIT arrhythmia
Notre modèle	DWT	Quadratic Discriminant	Accuracy: 99.92% CI: 99.07%-100% with a probability of 0.99. Misclassification cost: 1.5	Training data: MIT-BIH arrhythmia and normal rhythm sinus. And BIDMC congestive heart failure. Testing data: collected from 12 subjects with arrhythmia and congestive heart failure. 6minutes 13 sec records.

Tableau 11 Aperçu des études menés sur la classification automatisée des signaux ECG

		SVM	CNN	QDA	KNN	NB		SVM	QDA	KNN	NB
CWT	ARR	100%	100%		98.2%	96.6%	PCA activé	75%	-	94%	98%
	CHF	95.4%	100%	-	96.03%	100%		79%		95%	99%
	NSR	92%	81.28%		93%	91%		80.32%		90%	97%
DWT	ARR	99%		100%	98%	95%		98%	94%	90%	62%
	CHF	96%	-	99.78%	97.5%	95%		97.7%	94%	98%	81%
	NSR	97%		100%	96.6%	93.2%		96%	93.8%	84.04%	70%
MODWT	ARR	90.87%			97.85%	95%		98%	-	100%	71.83%
	CHF	91.71%	-	-	99.41%	95%		98%		100%	100%
	NSR	92%			95.98%	93.2%		95.9%		96%	63%
AM	ARR	99%		90.07%	97%	100%		68%	97%	95.47%	100%
	CHF	97%	-	90.01%	90%	100%		67%	93.7%	100%	95%
	NSR	100%		77%	92%	97.6%		72%	98.1%	91.9%	96.59%

Tableau 12 Résultats de la precision par classe

Les tableaux 13 et 14 récapitulent les résultats donnés par les différents classificateurs tout en désactivant et en activant l'ACP. Ils donnent également l'évaluation des performances de chaque configuration. Il est intéressant d'envisager de déployer ces modèles à titre d'essai pour confirmer la robustesse et la grandeur de ces modèles pour apprendre et classifier les données nouvellement vues. Cette considération est très importante car l'entraînement sur différentes données pourrait révéler plusieurs compromis concernant les caractéristiques invisibles des signaux. La connaissance préalable de ces modèles est également nécessaire, car l'observation du comportement des résultats concernant les données cliniques extraites est très importante pour évaluer le niveau de confiance de ces modèles.

IV. Conclusion

Le processus de soins dans les hôpitaux est soutenu par un large éventail d'activités opérationnelles, notamment la gestion des données, le diagnostic et le traitement. Il existe une forte corrélation entre le segment croissant de la population et les difficultés particulières de diagnostic et de gestion qui peuvent entraîner des disparités dans les soins et des retards dans le traitement. Dans ce cadre, l'objectif de ce chapitre est de présenter une variété de modèles développés prenant en compte la précision, l'impact d'une mauvaise classification et la durée d'exécution de chaque modèle afin de construire un système de diagnostic automatisé pour les maladies cardiovasculaires afin d'évaluer le personnel médical. Pour ce faire, nous avons comparé les performances des modèles CWT, DWT, MODWT et AM ainsi que SVM, CNN, ADQ, KNN et NB.

Les résultats après simulation ont montré que l'ADQ - DWT est plus performant que les autres méthodes avec une précision globale de 99,92 %, un IC de 99,07 % à 100 %, un niveau de certitude de 0,99 et un coût d'erreur de classification de 1,5. Comme perspectives, les travaux pourront être étendus à deux aspects : 1) l'étude de l'impact du diagnostic automatisé de l'arythmie et de l'insuffisance cardiaque congestive avec un niveau d'incertitude sur la logistique interne de l'hôpital qui peut réduire considérablement le nombre d'employés dans le service de diagnostic. 2) étudier l'impact de la précision de cette classification sur la capacité de l'hôpital à admettre de nouveaux patients et, par conséquent, à gérer la logistique externe.

Extraction / classification	SVM	CNN	ADQ	KNN	Naïve Bayes
CWT	95.81% (99% CI 89.71%-100%)	93.75 % (99% CI 87.44%-99.06%)	-	95.81% (99% CI 89.71%-100%)	95.85% (99% CI 91.77%-99.96%)
DWT	97.27% (99% CI 92.32%-100%)	-	99.92% (99% CI 99.07-100%)	97.25% (99% CI 92.32%-100%)	94.41% (99% CI 87.44%-100%)
MODWT	91.51% (99% CI 83.03%-97.57)	-	-	97.83% (99% CI 93.4%-100%)	94.41% (99% CI 87.44%-100%)
AM	98.63% (99% CI 95.1%-100%)	-	85.63% (99% CI 75.03%-95.17%)	93% (99% CI 87.27%-98.73%)	99.19% (99% CI 98.47%-100%)
Erreurs moyenne de classification	7.5	9	8.5	8	8.5
Temps d'exécution	327.33 seconds	406.21 seconds	354.79 seconds	219.44 seconds	354.34 seconds

Tableau 13 Résultats de la classification sans activation de PCA

Extraction / classification	SVM	ADQ	KNN	Naïve Bayes
CWT	78.13% (99% CI 65.79%-90.29%)	-	93% (99% CI 85.65%-100%)	98% (99% CI 93.85%-100%)
DWT	97.21% (99% CI 92.21%-100%)	93.69% (99% CI 86.5%-100%)	90.01% (99% CI 80.94%-99.08%)	71% (99% CI 57.21%-84.79%)
MODWT	97.28% (99% CI 92.35%-100%)	-	98.63% (99% CI 95.1%-100%)	78.26% (99% CI 65.82%-90.7%)
AM	69% (99% CI 54.69%-83.31%)	92.26% (99% CI 84.24%-100%)	95.87% (99% CI 89.82%-100%)	97.23% (99% CI 92.34%-100%)
Erreurs moyenne de classification	11.5	9.5	9	11
Temps d'exécution	104.236 seconds	158.63 seconds	157.47 seconds	101.548 seconds

Tableau 14 Résultats de la classification avec activation de PCA

Chapitre 3.2

Prévision des systèmes photovoltaïque

I. Introduction

En raison du faible coût total de production, l'énergie photovoltaïque constitue un élément clé des énergies renouvelables installées dans le monde. A ce constat, l'énergie photovoltaïque est de nature volatile car elle dépend des conditions météorologiques. Ceci qui rend l'intégration, le contrôle et l'exploitation de ce type d'énergie difficiles pour les opérateurs de réseaux. Dans l'architecture de réseau traditionnelle, les opérateurs de système ont accumulé suffisamment d'expérience pour pouvoir déterminer, à l'aide d'outils statistiques, le montant des réserves d'exploitation nécessaires pour maintenir la fiabilité du système. Néanmoins, avec l'introduction des énergies renouvelables (éolienne et photovoltaïque), la structure du réseau a changé. Afin de maintenir la stabilité du réseau, il devient fondamental de connaître l'état et la production des énergies renouvelables qui peuvent être combinées avec d'autres sources moins variables (mixte énergétique), et plus prévisibles pour satisfaire la demande énergétique. Par conséquent, la prévision des énergies renouvelables est un moyen simple d'intégrer en toute sécurité ce type d'énergie dans le réseau électrique actuel, en particulier la prévision de l'énergie photovoltaïque.

Basant sur ce constat mondial, nous avons mis en place au sein de l'EMSI une plateforme hybride (2 champs photovoltaïque, 2 éoliennes), pour la formation et la recherche. Dans ce cadre, le traitement des données, issues de la plateforme, pour la prédiction de la puissance des PV a fait l'objet de la thèse de A.Fentis. L'ensemble de ces travaux a donné lieu à des nombreuses publications [FEN19, FEN18, FEN171, FEN172]. Le travail consiste à proposer un modèle de prévision, hors ligne à court terme, utilisant que des données collectées en locale. L'objectif consiste à étudier les performances de plusieurs modèles autorégressifs non linéaires comparées à celles de modèles autorégressifs non linéaires avec des entrées exogènes.

L'énergie photovoltaïque (PV) s'est avérée être l'une des énergies renouvelables les plus prometteuses ces dernières années. Ce domaine a connu une augmentation significative de la valeur des investissements ; la capacité de production a atteint 227 GW en 2015 contre 5,1 GW en 2005. Mais avec l'émergence des énergies renouvelables comme alternative nécessaire à l'énergie fossile, de nouveaux défis sont apparus, qui nécessitent à la fois des producteurs et des gestionnaires de changer les méthodes de contrôle, les méthodes de distribution et toute la logistique associée. Dans la gestion traditionnelle du réseau, le gestionnaire de réseau doit maintenir l'équilibre entre l'offre et la demande à tout moment pour éviter les problèmes de sécurité du réseau et les pertes économiques. Le gestionnaire de réseau utilise une planification pour s'assurer que les centrales électriques produisent la bonne quantité d'électricité au bon moment pour répondre de manière cohérente et fiable à la demande d'électricité. Récemment L'énergie photovoltaïque a commencé à gagner du terrain sur les autres les énergies renouvelables ; cela est dû au coût total de production plus faible. Mais du point de vue de la gestion du réseau, la variabilité de la production solaire causée généralement par les nuages peut rendre plus difficile pour l'opérateur du réseau de prévoir la quantité de production électrique supplémentaire qui sera nécessaire pour assurer l'équilibre entre l'offre et la demande. C'est pourquoi la prévision des

énergies renouvelables s'impose comme une solution clé pour gérer efficacement les énergies renouvelables dans le réseau électrique. Elle doit être correctement prise en compte dans les processus décisionnels complexes nécessaires pour équilibrer l'offre et la demande dans le système électrique.

II. Stratégie et démarche

Dans les travaux de recherche existants, les auteurs ont proposé plusieurs modèles pour la prévision de la puissance des systèmes photovoltaïques. Les deux principaux défis de la prévision de l'énergie photovoltaïque sont la variabilité et l'incertitude, car la production des modules photovoltaïques présente une variabilité à toutes les échelles de temps. Cette variabilité est elle-même difficile à prévoir. Tout ça rend cette tâche de prévision des systèmes photovoltaïques difficiles [ZHA15].

Dans la littérature, les modèles de prévision de puissance photovoltaïque peuvent être divisés en trois catégories (Figure 52) :

- **Les modèles physiques** [HUA10] : Ils sont des modèles mathématiques basés sur une analyse physique du processus étudié. Ces modèles peuvent contenir un nombre limité de paramètres ajustables, qui ont une signification physique. Dans le cas du photovoltaïque, la modélisation physique utilise des équations mathématiques qui décrivent tous les phénomènes physiques qui régissent la conversion PV.
- **Les modèles statistiques** : Ces modèles sont utilisés lorsqu'il y'a un manque des connaissances et des informations sur le processus et les paramètres qui l'influencent. La modélisation statistique comprend les séries chronologiques [BAC09] et les modèles d'apprentissage statistique. La modélisation des séries temporelles a pour but de collecter et d'étudier les observations passées d'une série temporelle pour les ajustés à un modèle qui décrit leur structure interne. Le modèle développé est ensuite utilisé pour les valeurs futures prévues de la série, parmi les modèles les plus utilisés nous citons les modèles AR, ARX, ARIMA. Parmi les outils d'apprentissage statistique, le réseau de neurones artificiels. Cette technique est considérée la plus utilisée en raison de ses performances éprouvées en fonction du temps. Dans le cas de la prévision de la puissance photovoltaïque, les différentes architectures de réseau ont été utilisées avec un choix multiple de paramètres d'entrée. Parmi ses architectures nous pouvons citer l'Elman Réseau neuronal (ENN), réseau neuronal à régression généralisée (GRNN) [RAM15], réseau neuronal à fonction de base radiale (RBFNN), réseau neuronal dynamique récurrent (DRNN) [MEL14], et le réseau de neurones de Feed-Forward (FFNN), qui dans la plupart des cas, donne les meilleurs résultats [RAM15, MEL14]. Une autre technique d'apprentissage statistique nommé (SVM : Support Vector Machine) est utilisée aussi dans le secteur énergétique [SHI12, SIL12, LEO15, ZHA15].
- **Les modèles hybrides** : Il s'agit des modèles capables d'être construits à partir de n'importe quelle combinaison de modèles physiques et statistiques ; ils peuvent être une combinaison entre les approches physiques et statistiques [TAO10] ou purement statistique comme la combinaison de SOM et RBFNN [CHE11], ou SOM, SVR et inférence floue [YAN14], ou transformée en ondelettes et RBFNN [MAN12] et ainsi de suite.

Il faut noter qu'il n'y a pas de règle fixe et le choix dépend de plusieurs paramètres. A ce niveau, le choix de la technique dépend davantage de l'horizon, ainsi que des modèles physiques sont utilisés pour le moyen terme, des modèles statistiques pour le très court et le court terme et des modèles hybrides pour le moyen et le long terme [PEL13]. Donc, les paramètres d'entrée sont également un facteur

important qui peut modifier les résultats finaux dont des différentes collections d'entrée. Ces travaux ont montré que les principales variables influençant la puissance PV sont l'irradiation horizontale globale (GHI) à la surface du générateur PV, la température de la plaque et l'indice d'aérosol [SIL12, LIU15]. Cependant, il n'exclut pas les autres paramètres comme les prévisions météorologiques numériques (NWP), les mesures météorologiques effectuées dans les stations au sol, la mesure de la GHI et la couverture nuageuse par satellite, les mesures de la puissance PV, les variables liées à la géométrie solaire et au temps (angle zénithal, durée de la lumière), ainsi que d'autres [LEO15, MEL14 et RAM15].

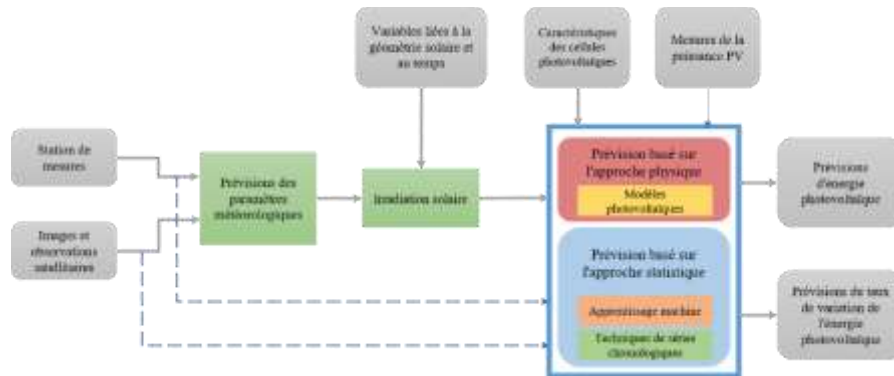


Figure 55 Modèles physique et statistique pour la prévision PV

Dans [BAC09], un modèle ARX a été proposé pour prévoir la puissance PV 6h à l'avance en utilisant la puissance PV historique et l'irradiation prévue comme entrées pour le modèle. Dans [CHU11], les auteurs ont utilisé un réseau neuronal récurrent pour prévoir la puissance PV 24 heures à l'avance en utilisant également la puissance PV historique et la température prévue. Dans [MAN12], la transformée en ondelettes et le réseau neuronal à fonction de base radiale (RBFNN) ont été combinés pour générer une prévision de la puissance PV une heure à l'avance. Les auteurs de [RAM15] adoptent une approche de modélisation hybride en appliquant une régression par étapes pour sélectionner les paramètres météorologiques qui sont fortement corrélés avec l'énergie solaire. Dans [CHE11], les auteurs analysent les performances d'un outil de prévision de la puissance PV 24 heures sur 24 basé sur un réseau neuronal de perceptron multicouche (MLP) formé avec une procédure de propagation des erreurs en retour (EBP).

Dans [DIN11], les auteurs ont proposé une approche intelligente basée sur la classification des types de temps et la détection des jours similaires pour prévoir la puissance PV (un horizon allant jusqu'à un jour). Ils ont proposé un réseau neuronal récurrent avec des éléments structurels pour la prévision de la puissance PV sur 24 heures. Dans [HOR91], les prévisions de températures élevées, moyennes et basses sont utilisées pour classer la production d'énergie PV historique en trois types de temps. Cependant, trois réseaux neuronaux à flux continu (RBFNN) ont été utilisés pour produire des prévisions 24 heures à l'avance. Dans [YAN14], les auteurs présentent une méthode hybride pour prévoir la production d'énergie photovoltaïque un jour à l'avance. La méthode proposée comprend trois étapes : une étape de classification des données, une étape de formation et une étape de prévision. L'étape de classification est développée en utilisant une carte autoorganisée (SOM) et une quantification vectorielle d'apprentissage (LVQ). L'objectif est de classer les données historiques de la puissance PV en cinq types de temps selon les prévisions météorologiques verbales du TCWB (Taiwan Center Weather Bureau). Dans une deuxième étape, la régression vectorielle d'apprentissage (SVR) est utilisée pour construire cinq modèles de prévision, un pour chaque type de temps. Dans la dernière étape, un algorithme d'inférence floue est utilisé pour sélectionner un modèle de prévision approprié afin d'obtenir des résultats plus précis.

Sur cet axe, nous combinons les caractéristiques des modèles de séries chronologiques et des modèles d'apprentissage statistique pour une prévision à court terme. Cette combinaison est intéressante car elle permet de fusionner la simplicité des modèles de séries temporelles et le caractère non linéaire des modèles de boîtes noires. Le résultat de cette fusion donne un modèle de séries temporelles non linéaire. L'idée est de développer un modèle capable de donner des prévisions précises à court terme sans faire recours à des prévisions météorologiques. A travers cette démarche, on a réussi de :

- Evaluer la performance de deux techniques d'apprentissage machine supervisé pour la prévision de la puissance photovoltaïque intra-journalière : Le réseau neuronal à action directe (FFNN) et les moindres carrés supportent la régression machine vectorielle (LSSVR).
- Etudier l'influence et la suffisance des données collectées en locale comme paramètres d'entrée des modèles développés.

III. Les techniques d'apprentissage statistique

1. LSSVR

L'algorithme LSSVM (Least Squares Support Vector Machine) est une version améliorée de la SVM utilisée pour résoudre les problèmes de classification. En raison des contraintes de type d'égalité dans la formulation, la solution sera obtenue en résolvant un ensemble d'équations linéaires, au lieu de la programmation quadratique pour la technique SVM classique. La formulation du SVM de Vapnik a été modifiée en un problème d'optimisation du LSSVM sous-jacent à la formation non linéaire du LSSVM formulé par :

$$\min_{w,b,e} J(w,b,e) = \frac{1}{2} w^T w + \frac{\gamma}{b} \sum_{i=1}^N e_i^2 \quad (24)$$

Sous réserve des contraintes d'égalité

$$y_i [w^T \varphi(x_i) + b] = 1 - e_i \quad (25)$$

Cette formulation consiste en des contraintes d'égalité plutôt que d'inégalité et prend en compte une erreur au carré avec un terme de régularisation similaire à la régression de crête. La solution est obtenue après avoir construit le Lagrangien :

$$\mathcal{L}(w,b,e,\alpha) = J(w,b,e) - \sum_{i=1}^N \alpha_i \{y_i [w^T \varphi(x_i) + b] - 1 + e_i\} \quad (26)$$

Où $\alpha_i \in \mathbb{R}$ sont des multiplicateurs de Lagrange qui sont toujours positifs, des conditions d'optimalité, on obtient le système Karush-Kuhn-Tucker (KKT) :

$$\begin{cases} \frac{\partial \mathcal{L}}{\partial w} = 0 \rightarrow w = \sum_{i=1}^N \alpha_i y_i \varphi(x_i) \\ \frac{\partial \mathcal{L}}{\partial b} = 0 \rightarrow \sum_{i=1}^N \alpha_i y_i = 0 \\ \frac{\partial \mathcal{L}}{\partial e_i} = 0 \rightarrow \alpha_i = \gamma e_i \\ \frac{\partial \mathcal{L}}{\partial \alpha_i} = 0 \rightarrow y_i [w^T \varphi(x_i) + b] - 1 + e_i = 0 \end{cases} \quad (27)$$

Notez que la rareté est perdue, ce qui ressort clairement de l'état $\alpha_i = \gamma e_i$. Comme dans le SVM standard, nous ne calculons ni w ni $\varphi(x_i)$. Par conséquent, nous éliminons w et e en fonction de [31].

$$\begin{bmatrix} 0 \\ y \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1_v^T \\ \Omega + \gamma^{-1}I \end{bmatrix} \begin{bmatrix} b \\ \alpha \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 \\ 1_v \end{bmatrix} \quad (28)$$

Avec $y = [y_1, \dots, y_N]$, $1_v = [1, \dots, 1]$, $e = [e_1, \dots, e_N]$ et $\alpha = [\alpha_1, \dots, \alpha_N]$. L'état de Mercer est appliqué à l'intérieur de la matrice Ω .

$$\Omega_{ij} = y_i y_j \varphi(x_i)^T \varphi(x_j) = y_i y_j K(x_i, x_j) \quad (29)$$

Pour la fonction $K(-, -)$ du noyau, là encore, on a généralement les choix suivants :

$$\begin{cases} \text{Linear Kernel: } K(x_i, x_j) = x_i^T x_j \\ \text{Polynomial Kernel: } K(x_i, x_j) = (1 + \frac{x_i^T x_j}{c})^d \\ \text{RBF Kernel: } K(x_i, x_j) = \exp\left\{-\frac{\|x_j - x_i\|_2^2}{\sigma^2}\right\} \\ \text{MLP Kernel: } K(x_i, x_j) = \tanh(\kappa x_i^T x_j + \theta) \end{cases} \quad (30)$$

Où d , c , σ et θ sont des constantes. Dans le cas des moindres carrés supportant la régression vectorielle (LSSVR), certains changements dans la formulation de la LSSVM auront lieu. Dans ce cas, nous essayons de trouver la meilleure fonction de régression dans la forme :

$$y(x) = w^T \varphi(x) + b \quad (31)$$

Avec $x \in \mathbb{R}^n$, $y \in \mathbb{R}$. Donner un apprentissage set $\{x_i, y_i\}_{i=1}^N$, dans ce cas, le problème d'optimisation est donné par :

$$\min_{w,b,e} J(w, b, e) = \frac{1}{2} w^T w + \frac{\gamma}{2} \sum_{i=1}^N e_i^2 \quad (32)$$

Sous réserve des contraintes d'égalité

$$y_i = w^T \varphi(x_i) + b + e_i \quad (33)$$

Le double problème qui en résultera en cas de régression sera :

$$\begin{bmatrix} 0 \\ 1_v \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1_v^T \\ \Omega + \gamma^{-1}I \end{bmatrix} \begin{bmatrix} b \\ \alpha \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 \\ y \end{bmatrix} \quad (34)$$

Avec $\Omega_{ij} = \varphi(x_i)^T \varphi(x_j)$

Le modèle final sera :

$$y(x) = \sum_{i=1}^N \alpha_i K(x_i, x) + b \quad (35)$$

Avec $\alpha_i = \gamma e_i$

2. FFNN

Le réseau neuronal est capable de réaliser une cartographie arbitraire d'un espace vectoriel sur un autre espace vectoriel. Ces réseaux neuronaux sont capables d'utiliser des informations a priori inconnues

cachées dans les données, mais ils ne sont pas capables de les extraire. Il faut noter que dans le formalisme mathématique, apprendre signifie ajuster les coefficients de pondération de manière à ce que certaines conditions soient remplies. Pour définir un réseau de neurones, nous introduisons d'abord le modèle linéaire défini comme :

$$g(x, w) = \sum_{i=1}^P w_i f_i(x) \quad (36)$$

Où le vecteur w est le vecteur des paramètres du modèle, et où les fonctions $f(x)$ sont des fonctions non paramétrées pour la variable x . Les réseaux de neurones sont inclus dans la catégorie des modèles non linéaires dans leurs paramètres. La forme la plus courante de réseau statique de neurones est une simple extension de la relation précédente :

$$g(x, w) = \sum_{i=1}^P w_i f_i(x, w') \quad (37)$$

Où $f_i(x, w')$ sont des fonctions paramétrées, appelées « neurones » qui est présenté à la figure 56. Les variables sur lesquelles les opérations neuronales sont souvent indiquées sous le terme d'intrants du neurone, et la valeur de la fonction sous le terme de la production. Les paramètres w_i avec sont indiqués sous la rubrique nom des « poids » ou « poids synaptiques », en raison de la l'inspiration des réseaux de neurones. La production de neurones est une fonction non linéaire d'une combinaison des variables x_i pondérée par les paramètres w_i . Le paramètre w_0 est une constante terme appelé "parti pris". La fonction f est appelée "fonction d'activation". La sortie d'un neurone est donnée par l'équation :

$$y = f[w_0 + \sum_{i=1}^n w_i x_i] \quad (38)$$

Un neurone réalise une fonction non linéaire. L'avantage des neurones réside dans les propriétés qui résultent de leur association en réseaux. Il y a une grande variété de topologies pour ce type de réseaux. Néanmoins, la topologie la plus utilisée est le perceptron multicouche (MLP), dont l'exemple est représenté à la figure 57. Suite à cela, la première couche est appelée l'entrée et la dernière couche est appelée "couche de sortie". Ce réseau effectue des calculs algébriques N fonctions de la variable N du réseau. Le MLP est mathématiquement représenté par l'expression :

$$g(x, w) = \sum_{i=1}^{N_c} [w_{N_c+1,i}, f(\sum_{j=1}^n w_{ij} x_j + w_{i0})] + w_{N_c+1,0} = w_2 f(W_1 x) \quad (39)$$

Où x est le vecteur des variables (de dimension $n + 1$), w_2 est le vecteur des poids de la deuxième couche (de dimension N_{c+1}) et W_2 est la matrice des poids de la première couche (de dimension $N_{c+1}, n + 1$). Par convention, le paramètre w_{ij} désigne le poids entre le neurone j vers le neurone i . Le modèle $g(x, w)$ est une fonction linéaire des paramètres de la dernière couche, et c'est une fonction non linéaire des paramètres de la première couche de connexions.

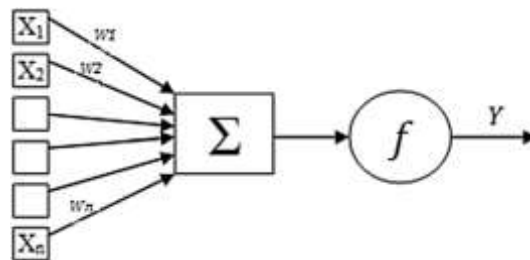


Figure 56 Présentation d'un simple neurone

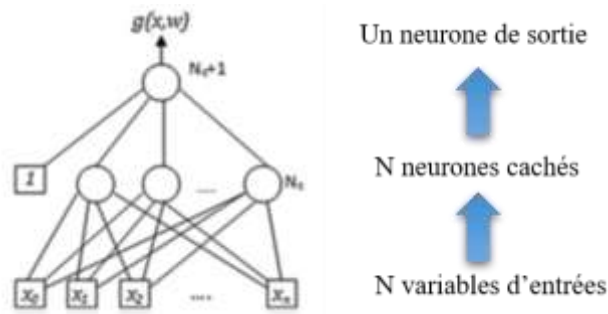


Figure 57 Architecture multicouche du réseau neuronal de perceptron

IV. Plateforme et démarche

1. Plateforme

Les données utilisées dans ces travaux sont collectées à partir de la plateforme installée à l'École marocaine des sciences de l'ingénieur à Casablanca, au Maroc (latitude = 33,5415060 et longitude = -7,6735389) (figure 58). Une partie de la plateforme est composée d'installations photovoltaïques. Il s'agit d'un parc des photovoltaïques installés sur toit de l'école, avec une puissance crête de 3,2kw, une inclinaison de 40° et orientée vers le sud. Ce parc est composé de 12 modules du constructeur Voltec Solar (six monocristallins et six polycristallins). Chaque six modules sont connectés à un onduleur SMA SUNNY-BOY. A ce niveau, les deux onduleurs SMA SUNNY-BOY sont connectés à un onduleur/chargeur MultiPlus (Victron Energy), l'onduleur/chargeur MultiPlus nous permet de contrôler la charge/décharge d'un parc de batteries de 3kw ainsi que de contrôler l'injection dans le réseau. La plate-forme contient éventuellement une station météorologique basée sur la SMA Sunny SensorBox qui mesure les irradiances horizontale GHI, température ambiante du module ainsi que la vitesse du vent. Les paramètres météorologiques sont enregistrés toutes les 15 minutes. Toutes les mesures sont stockées via une WebBox SMA. Les caractéristiques de l'installation photovoltaïque sont présentées dans les tableaux 15 et 16.

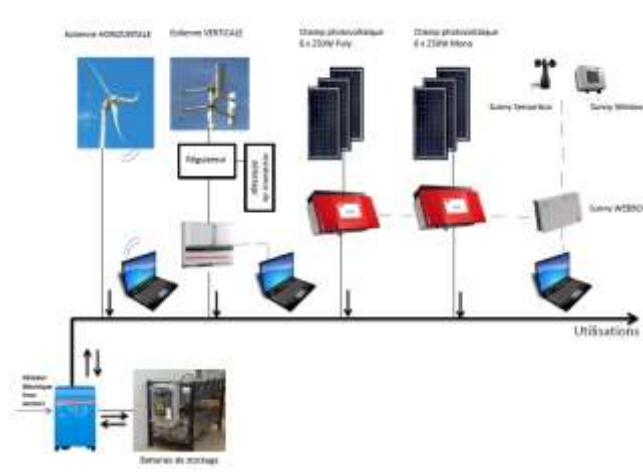


Figure 58 Plateforme PV EMSI Casablanca – Maroc -

Paramètres	Description
Fabricant	Voltec Solar
Tension Max	30.36 V
Puissance Max	255.36 Wc
Courant de puissance Max	8.40 A

Tableau 15 Caractéristiques des panneaux solaires installés

Paramètres	Description
Fabricant	SMA
Tension de démarrage	140 V
Tension Max	600 V
Courant Max	12 A
Tension	1600 W
Fréquence	50 Hz

Tableau 16 Caractéristiques de l'onduleur

Dans ces travaux, nous avons utilisé une base de données constituée d'une collecte de 6 mois, allant du 1er juillet jusqu'au 31 décembre 2014. La collecte de 5 mois (juillet-novembre) contient des données manquantes, tandis que les données de décembre sont intactes. Afin de remédier à ce problème, nous utilisons une procédure de comblement des lacunes. Dans le cas des séries chronologiques photovoltaïques, le choix de la méthode appropriée dépend de différents facteurs tels que la longueur des données existantes, la disponibilité de données météorologiques fiables et le climat du lieu [OGU14]. L'interpolation conventionnelle reste la méthode la plus utilisée en raison de sa simplicité, mais elle n'est pas toujours la plus efficace. Donc, nous avons utilisé la méthode d'interpolation classique pour combler les lacunes des données solaires et photovoltaïques. Dans la littérature, il existe plusieurs méthodes pour remédier à ces lacunes à savoir : [BRO16, 2, 24. Nous avons choisi cette méthode en raison de sa simplicité et aussi parce que la longueur des lacunes ne pas dépasser 3 h.

2. Les mesures statistiques

Pour évaluer la précision du modèle, nous devons choisir les bonnes mesures de performance car la modélisation est un processus itératif. Ces mesures consistent à faire des allers-retours entre la sortie du modèle et la valeur souhaitée. La mesure de l'erreur de prévision est importante pour valider le modèle. Il est donc nécessaire d'utiliser des critères de performance capable de mesurer à quel point les sorties sont proches des résultats éventuels. Cependant, des mesures statistiques bien connues sont utilisées à savoir : l'erreur moyenne absolue (MAE), erreur de biais moyenne (MBE), erreur quadratique moyenne (MSE), moyenne racine l'erreur quadratique moyenne (EQM) et l'erreur quadratique moyenne, également appelée coefficient de détermination (R2). Ces paramètres sont définis comme suit.

$$MAE = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n |\hat{y}_i - y_i| \quad (40)$$

$$MBE = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (\hat{y}_i - y_i) \quad (41)$$

$$MSE = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (\hat{y}_i - y_i)^2 \quad (42)$$

$$RMSE = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (\hat{y}_i - y_i)^2}{n}} \quad (43)$$

$$R^2 = 1 - \frac{\sum_{i=1}^n (\hat{y}_i - y_i)^2}{\sum_{i=1}^n (\bar{y}_i - y_i)^2} \quad (44)$$

3. Développement de modèles

A. Procédure d'apprentissage

Nous avons adopté une procédure d'apprentissage basée de trois étapes : prétraitement, apprentissage et validation, et puis le test. L'idée de cette démarche est que l'étape de prétraitement constituée par une procédure de comblement des lacunes utilisant la méthode d'interpolation linéaire. Dans l'étape d'apprentissage, nous avons procédé à chercher les meilleures combinaisons des algorithmes FFNN et LSSVR. Par ailleurs, nous avons utilisé une démarche composée d'un algorithme d'apprentissage combiné à une procédure de validation croisée basée sur l'erreur quadratique moyenne (EQM) comme critère de jugement. Quant au test, nous avons utilisé une partie des données qui n'est pas été utilisée lors de la phase d'apprentissage pour tester les performances du modèle. Ainsi, pour LSSVR, dans la phase d'apprentissage et de validation, nous avons utilisé l'algorithme d'optimisation minimale séquentielle (SMO) pour trouver les paramètres de la fonction de base radiale (RBF), utilisée comme fonction de noyau, ainsi que les paramètres γ et σ^2 . Au cours de la phase de test, l'algorithme est alimenté par de nouvelles données ; les sorties estimées sont comparées aux sorties réelles, et des mesures de performance sont calculées pour évaluer la précision du modèle. Le meilleur modèle sera celui qui nous donnera l'erreur de prévision minimale, la figure 56 résume la procédure utilisée.

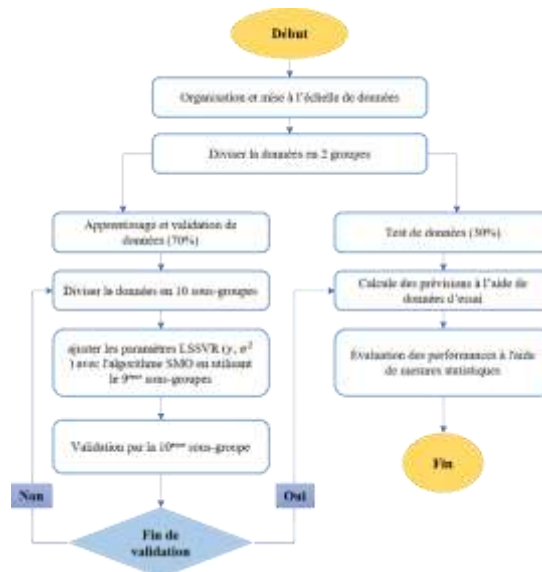


Figure 59 L'approche utilisé dans l'apprentissage LSSVR

B. Sélection des entrées

Il faut noter que les paramètres qui influencent le plus la prévision du photovoltaïque sont l'irradiation solaire horizontale (Irr), la température des cellules (Tc), la température ambiante et l'indice d'aérosol. Suite à cela, nous avons utilisé les données suivantes : l'historique de la production d'énergie PV (P), l'irradiation solaire horizontale globale mesurée (Irr) et la température des modules photovoltaïques mesurée (Tc), collectées via la WEBBox de SMA. Ces données ont la particularité d'être simples à collecter localement et de ne pas nécessiter un investissement considérable. Mathématiquement, trouver un modèle de prévision photovoltaïque en une étape consiste à trouver une fonction dans le formulaire :

$$P_{t+1} = f(x) \quad (45)$$

Avec un vecteur x des paramètres d'entrée, il s'agit d'un vecteur de paramètres exogènes ou un vecteur d'auto-régression pure paramètres. Ceci à générer deux types de modèles : un modèle autorégressif non linéaire avec entrées exogènes et un modèle autorégressif non linéaire pur. L'étude s'oriente vers le choix de x et son influence sur la précision du modèle. De plus, nous avons testé différentes combinaisons des trois paramètres mesurés localement : l'irradiation solaire (Irr), la température des cellules (Tc) ainsi que la puissance PV (P). Pour comparer la précision des modèles obtenus, des mesures statistiques ont été utilisées. Aussi, pour donner plus de sens aux résultats, nous avons comparé les performances des modèles avec deux autres modèles statistiques utilisés comme référence : le modèle persistant ainsi qu'un modèle de régression polynomiale multivariée (MPR).

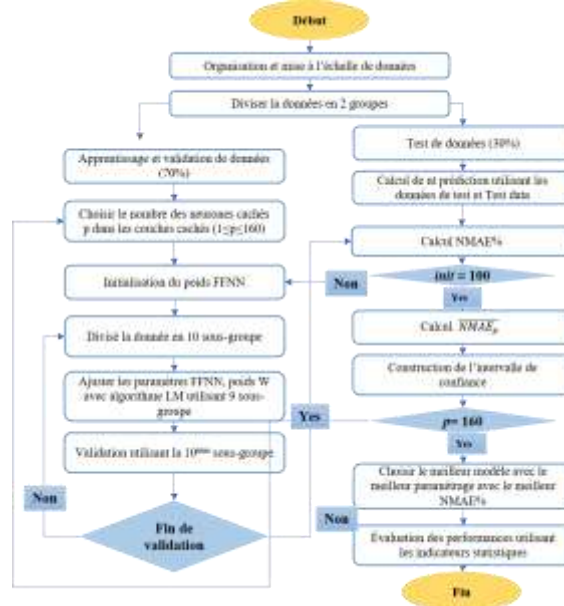


Figure 60 L'approche utilisée dans l'apprentissage FFNN

V. Analyse des résultats

1. Auto-régression non linéaire avec des entrées exogènes modèles (NARX)

Pour les séries chronologiques, un modèle non linéaire autorégressif avec des entrées exogènes (NARX) est un modèle relie la valeur actuelle de la production aux valeurs passées de la même production et aux

valeurs actuelles et passées des entrées externes qui influencent la production d'intérêt. Un tel modèle peut être formulé de la manière suivante.

$$Y_t = F(Y_{t-1}, Y_{t-2}, \dots, Y_{t-N}; U_{t-1}, U_{t-2}, \dots, U_{t-N}) + \varepsilon_t \quad (46)$$

Où la fonction F est une fonction non linéaire, avec Y est la variable d'intérêt, U est la variable exogène et ε_t un terme d'erreur de prévision. Dans cette étude, nous avons utilisé une combinaison de trois paramètres mesurés locale à savoir : l'irradiation solaire horizontale (Irr) et la température du module PV (Tc) comme entrées exogènes U , la puissance du module PV (P) comme variable d'intérêt Y . Les premières fonctions à évaluer sont :

$$MOD_1: P_{t+1} = F(Irr_t, Tc_t) + \varepsilon \quad (47)$$

$$MOD_2: P_{t+1} = F(Irr_t, Tc_t, P_t) + \varepsilon \quad (48)$$

$$MOD_3: P_{t+1} = F(Irr_t, Tc_t, P_{t-1}, P_t) + \varepsilon \quad (49)$$

$$MOD_4: P_{t+1} = F(Irr_{t-1}, Irr_t, Tc_{t-1}, Tc_t, P_{t-1}, P_t) + \varepsilon \quad (50)$$

$$MOD_5: P_{t+1} = F(Irr_t, Tc_t, P_{t-2}, P_{t-1}, P_t) + \varepsilon \quad (51)$$

$$MOD_6: P_{t+1} = F(Irr_t, Tc_t, P_{t-3}, P_{t-2}, P_{t-1}, P_t) + \varepsilon \quad (52)$$

Pour trouver la fonction F la plus précise, donnée par les équations 47-52, nous avons utilisé les approches FFNN et LSSVR.

- Approche basée sur LS-SVR

Nous avons utilisé l'algorithme d'optimisation minimale séquentielle (SMO), pour trouver les paramètres de la fonction de base radiale (RBF) ainsi que les paramètres γ et σ^2 . Les paramètres les mieux fondés pour les modèles LSSVR-NARX sont présentés dans les tableaux 17 et 18. Les résultats obtenus présentent des caractéristiques intéressantes.

Modèle	γ	σ^2
MOD_1	2.58	2.82
MOD_2	48554.86	8.528
MOD_3	261.023	11.99
MOD_4	1051.57	42.43
MOD_5	67117.98	118.51
MOD_6	846.78	32.27

Tableau 17 Les paramètres LSSVR-NARX

Modèle	MSE	R^2
MOD_1	0.0124	0.8413
MOD_2	0.0090	0.8846
MOD_3	0.0087	0.8889
MOD_4	0.0091	0.8837
MOD_5	0.0089	0.8865
MOD_6	0.0082	0.8956

Tableau 18 Les résultats du modèle LSSVR-NARX

La classification des modèles donne une idée sur l'influence des paramètres de sortie sur la précision des résultats. Après l'analyse des résultats de la simulation, nous avons constaté que les données Irr_t et TC_t seules ne sont pas suffisantes, car le modèle MOD_1 donne des résultats moins précis comparant aux autres modèles. Ainsi, selon les résultats du modèle MOD_2 , nous avons observé que la combinaison des paramètres Irr_t , TC_t et P_t donnent de meilleurs résultats comparant avec MOD_1 . Les résultats obtenus par MOD_3 confirment cette observation. L'ajout du paramètre P_{t-1} au modèle MOD_2 améliore considérablement la précision des prévisions. Tandis que l'ajout des paramètres Irr_{t-1} et TC_{t-1} au MOD_2 (MOD_4) réduit la précision et donne des résultats qui sont presque équivalents à ceux du MOD_1 . A ce niveau, nous pouvons observer que l'utilisation des paramètres Irr_t et TC_t donne de bons résultats, mais l'ajout des données historiques pourra améliorer considérablement la précision du modèle. A cet effet, nous avons décidé de créer deux autres modèles dans lesquels nous augmentons le nombre d'entrées autorégressives en ajoutant le modèle MOD_3 l'entrée P_{t-2} pour créer le MOD_5 . Juste après, nous avons ajouté l'entrée P_{t-3} pour créer le MOD_6 .

- Approche basée sur FFNN

A ce niveau, nous avons utilisé la procédure de dimensionnement des ANN de manière à trouver la meilleure configuration pour chaque modèle. Donc, pour l'un des modèles, nous choisissons une fonction d'activation et nous utilisons la procédure de dimensionnement pour choisir le meilleur nombre de neurones cachés. Puis, nous changeons la fonction d'activation et nous répétons la même procédure pour trouver le meilleur nombre de neurones cachés. Nous procédons ainsi jusqu'à trouver la meilleure fonction d'activation et le meilleur nombre de neurones cachés pour tous les modèles développés. L'AFNN a été réentraîné 100 fois, pour choisir le meilleur nombre de neurones dans la couche cachée, de telle sorte que chaque entraînement se fasse avec un poids synaptique à initialisation différente des autres.

Modèle	RBF	Logsig	Tansig	NMAE%
MOD_1	6	8	5	5.73%
MOD_2	5	7	6	4.72%
MOD_3	37	6	8	4.54%
MOD_4	10	10	10	5.65%
MOD_5	30	8	11	4.61%
MOD_6	36	12	14	4.48%

Tableau 19 Les résultats de dimensionnement ANN pour les modèles NARX

Modèle	R^2 (%) RBF	R^2 (%) Logsis	R^2 (%) Tansig
MOD_1	84.39	84.66	84.87
MOD_2	88.57	89.10	88.61
MOD_3	89.36	86.47	89.86
MOD_4	00.2	00.42	87.89
MOD_5	88.2	88.42	88.49
MOD_6	90.63	89.33	90.73

Tableau 20 Les résultats du modèle FNN-NARX

Après avoir analysé tous les résultats des modèles FFNN-NARX présentés dans le tableau 19, nous constatons aussi que les entrées Irr_t et TC_t ne suffisent pas pour faire des prévisions précises. Par conséquent, les résultats obtenus sont conformes à ceux de la LSSVR-NARX, sauf que les modèles

FFNN-NARX démontre une légère supériorité sur le LSSVR-NARX dans 75% des cas. Pour les modèles FFNN-NARX, la fonction d'activation du sigmoïde Tangent donne le meilleur résultat dans 83% des cas, avec un coefficient de détermination $R^2 = 90,73\%$ donné par le MOD_6 .

2. Modèles autorégressifs non linéaires (NAR)

Dans cette partie, nous étudions les résultats obtenus à partir de quatre modèles autorégressifs non linéaires purs (NAR). Dans la modélisation des séries chronologiques, le modèle autorégressif non linéaire spécifie que la variable de sortie dépend de façon non linéaire de ses propres valeurs antérieures et d'un terme d'erreur de prévision. Ce type de modèles peut être formulé comme suit :

$$Y_t = F(Y_{t-1}, Y_{t-2}, \dots, Y_{t-N}) + \varepsilon_t \quad (53)$$

Afin de réaliser ces modèles, nous avons utilisé uniquement l'historique des valeurs de la puissance PV comme entrée. Donc, nous voulons réaliser un modèle autorégressif non linéaire pur sans paramètres exogènes. Pour trouver la meilleure fonction F , nous avons utilisé, pareil pour les modèles NARX, les approches LSSVR et FFNN. Pour ce faire, nous avons développé quatre modèles qui remplissent les fonctions suivantes :

$$MOD_7: P_{t+1} = f(P_t) + \varepsilon \quad (54)$$

$$MOD_8: P_{t+1} = f(P_{t-1}, P_t) + \varepsilon \quad (55)$$

$$MOD_9: P_{t+1} = f(P_{t-2}, P_{t-1}, P_t) + \varepsilon \quad (56)$$

$$MOD_{10}: P_{t+1} = f(P_{t-3}, P_{t-2}, P_{t-1}, P_t) + \varepsilon \quad (57)$$

Ici aussi, ε désigne l'erreur de prévision ; il a des valeurs différentes pour les différents modèles.

- Approche basée sur LSSVR

Nous présentons ici les résultats de simulation obtenus en utilisant l'algorithme LSSVR. Le tableau 21 présente les paramètres des modèles LSSVR-NAR après utilisation de l'algorithme SMO.

Modèle	γ	σ^2
MOD_7	25664.51	13.758
MOD_8	80630.94	34.44
MOD_9	15.95	3.70
MOD_{10}	5.8885	3.1766

Tableau 21 Les meilleurs paramètres LSSVR-NAR

Les résultats de la simulation sont également présentés dans le tableau 23. Nous remarquons que tous les modèles LSSVR-NAR donnent de bons résultats. Nous observons également que plus nous ajoutons l'historique des valeurs PV comme entrées, plus nous augmentons la précision. Les comparaisons entre les modèles LSSVR-NAR et les modèles LSSVR-NARX ont révélé que les modèles LSSVR-NAR donnent des résultats nettement meilleurs. Du point de vue de la précision, on remarque que tous les modèles LSSVR-NAR donnent de meilleurs résultats que le modèle MOD_6 . Nous remarquons également que plus nous ajoutons les anciennes puissances du PV, plus nous augmentons la précision des prévisions obtenues. En conclusion, la comparaison entre les différents modèles nous amène à souligner

l'importance des anciennes valeurs de la puissance PV comme paramètres d'entrée dans la prévision hors ligne de la puissance PV à court terme.

Modèle	MSE	R^2
MOD_7	0.0092	0.8027
MOD_8	0.0081	0.8927
MOD_9	0.0072	0.9074
MOD_{10}	0.0066	0.9152

Tableau 22 Les résultats du modèle LSSVR-NAR

- Approché basée sur FFNN

Dans la même logique que les modèles FFNN-NARX, ces modèles ont été formés en utilisant la même procédure. Le tableau 23 résume les résultats obtenus en donnant le meilleur nombre de neurones dans la couche cachée ainsi que le pourcentage du NMAE correspondant.

Modèle	Meilleur nombre des couches neurones	Meilleur NMAE%
MOD_7	8	4.80%
MOD_8	9	4.31%
MOD_9	6	4.21%
MOD_{10}	7	4.08%

Tableau 23 Les résultats de dimensionnement ANN pour les modèles NAR

Modèle	R^2 (%) RBF	R^2 (%) Logsis	R^2 (%) Tansig
MOD_7	88.49	88.30	88.52
MOD_8	90.15	90.75	90.59
MOD_9	92.03	91.37	91.26
MOD_{10}	91.32	91.11	91.20

Tableau 24 Les résultats du modèle NAR

Les résultats obtenus par les modèles FFNN-NAR sont repris dans le tableau 24. Les résultats rejoignent et rectifient ceux annoncés dans le cas du LSSVR-NAR. Tous les modèles NRA démontrent une supériorité par rapport aux modèles NARX. Même à ce niveau, les résultats de l'algorithme FFNN dépassent légèrement les résultats obtenus par le LSSVR. Mais si nous tenons compte du temps d'exécution, les choses vont changer. Car pour le FFNN, la procédure prend du temps pour trouver les meilleurs paramètres du modèle. Contrairement au LSSVR entraîné avec l'OMU et qui ne prend pas beaucoup de temps pour trouver les meilleurs paramètres. Quant au FFNN-NAR, les résultats démontrent que la fonction d'activation de la base radiale donne les meilleurs résultats dans 50 % des cas, avec un coefficient de détermination $R^2 = 92,03\%$ donné par le MOD_8 .

3. Modèles de référence

Dans cette partie, nous présentons les résultats obtenus par les deux modèles statistiques de référence à savoir : le modèle de régression polynomiale multivariée et le modèle persistant. Le modèle persistant est considéré comme un prédicteur naïf, présentant le modèle de prévision le plus rentable qui suppose que les conditions ne changeront pas. En conséquence, la puissance PV à le temps $t + 1$ sera égal à ceux du temps t . Ce modèle simple constitue un élément de repère par rapport aux systèmes les plus

sophistiqués. Il est considéré comme un modèle de référence le plus populaire pour les prévisions de puissance à court terme. D'autre part, le modèle multivarié (modèle de régression polynomiale -MPR-) est un modèle sophistiqué. Il s'agit d'une extension du polynôme ordinaire régression, dans laquelle la relation entre les variables d'entrée x et la variable de sortie y est modélisée comme un nième degré dans x . L'équation (58) présente un exemple de polynôme de seconde ordonner une régression polynomiale multiple :

$$y = \beta_0 + \beta_1 x_1 + \beta_2 x_2 + \beta_{11} x_1^2 + \beta_{22} x_2^2 + \beta_{12} x_1 x_2 + \varepsilon \quad (58)$$

Cela peut à nouveau être représenté sous forme de matrice comme :

$$Y = \beta X + \varepsilon \quad (59)$$

Où est β la matrice des poids, X est la matrice des paramètres d'entrée et Y est la sortie. Les deux modèles sont utilisés comme référence pour vérifier la performance des modèles développés. Il a ensuite été démontré l'efficacité de ces modèles dans la prévision de la puissance PV à court terme. Les résultats de la simulation sont présentés dans le tableau 25. Nous observons que le modèle MPR donne des résultats aussi proches que ceux de l'AFNN et les modèles LSSVR, tandis que le modèle persistant donne une $ESM = 0,0092$. Nous utiliserons la performance du modèle persistant, avec un $ESM = 0,0092$, afin d'aider à identifier les modèles qui méritent d'être utilisés. Cependant, ils doivent donner plus résultats intéressants que ceux du modèle persistant car ils sont plus complexes.

Modèle	MSE LSSVR	MSE FFNN	MSE MPR	Persistant
MOD_1	0.0124	0.118	0.0128	0.0092
MOD_2	0.0090	0.0089	0.0089	
MOD_3	0.0087	0.0079	0.0090	
MOD_4	0.0091	0.0093	0.0095	
MOD_5	0.0086	0.0090	0.0093	
MOD_6	0.0082	0.0073	0.0091	
MOD_7	0.0092	0.0090	0.0091	
MOD_8	0.0081	0.0074	0.0088	
MOD_9	0.0072	0.0068	0.0081	
MOD_{10}	0.006	0.0069	0.0080	

Tableau 25 MPR et persistant vs LSSVR et FFNN

Selon cette contrainte, nous observons que les modèles LSSVR et Les FFNN sont classés premiers parce que leurs résultats sont supérieurs à ceux du modèle persistant, à l'exception du modèle LSSVR- MOD_1 et FFNN- MOD_1 . Le modèle MPR surpasse également le modèle dans 70 % des cas. Mais, il reste moins efficace que la LSSVR et la FFNN. Une simple comparaison des résultats montre la supériorité des deux approches FFNN et LSSVR, dans presque tous les modèles. Jusqu'à présent, le FFNN est le meilleur, bien sûr avec un temps de calcul très élevé. Cependant, le MPR et le LSSVR consomment presque autant temps de calcul mais avec une supériorité de la LSSVR.

VI. Conclusion

Dans les travaux de cet axe, des modèles hors ligne ont été proposés capables prévoir la puissance PV à court terme en utilisant uniquement les informations collectées par le système de surveillance local. Il s'agit donc d'un système de prévision sans recours aux plateformes météorologiques. Les modèles hors

ligne sont bénéfiques pour les opérateurs de réseau ainsi que pour les particuliers car la majorité des modèles de prévision de la puissance PV existants utilisent des prévisions météorologiques numériques. Le problème est que l'accès aux informations sur ce type de plateforme n'est pas donné à tout le monde, en particulier pour les installations isolées. Dans le but d'étudier le comportement de chaque modèle et de chaque algorithme, nous avons combiné la simplicité des modèles de séries temporelles (AR et ARX) et la non-linéarité des modèles d'apprentissage statistique (FFNN et LSSVR). Nous avons également utilisé une combinaison différente de données collectées dans le but d'analyser l'influence des différentes données collectées localement sur la précision des prévisions.

Partie 4 Management des énergies mixtes

Chapitre 4.1

Optimisation des énergies mixtes

I. Introduction

L'intermittence des sources d'énergie renouvelables individuelles affecte considérablement leur fiabilité, et c'est pourquoi des systèmes hybrides d'énergie renouvelable (HRES) sont introduits. Les HRES sont notamment utilisées pour répondre aux besoins des charges résidentielles. Néanmoins, les excédents et les pénuries d'électricité représentent toujours des problèmes qui doivent être traités par les systèmes de gestion de l'énergie. Les travaux de ce chapitre (en collaboration entre l'EMSI, la FRDISI et l'ENSEM) a fait l'objet de la thèse de A.Chakir, concernant le développement des architectures des systèmes hybride. Ces travaux ont débuté aussi avec l'installation de la plateforme énergétique de l'EMSI, ont donné lieu à des nombreux contributions [CHA20, CHA191, CHA192, CHA193, CHA181, CHA182]. L'idée de ce travail consiste à proposer une nouvelle méthode de gestion optimale de l'énergie d'un micro-réseau connecté au réseau, composé de cinq maisons intelligentes et connectées. La stratégie de gestion de l'énergie proposée est organisée en trois niveaux, à savoir : i) HRES, ii) ordonnancement de la charge et iii) partage de la communication entre les HRES. Les deux premiers niveaux de gestion de l'énergie sont traités au niveau local, c'est-à-dire à l'intérieur de chaque maison. Pour le troisième niveau a pour objectif de démontrer la faisabilité des interactions et de la communication entre les cinq différentes maisons interconnectées en utilisant une topologie d'infrastructure optimisée sur la base d'un réseau de quartier intelligent. Chacune de ces maisons est alimentée par son propre système d'énergie renouvelable hybride, assurant le basculement entre plusieurs sources : photovoltaïque, éolienne, batterie et micro-réseau. Cela aide chaque maison à gérer son surplus et à faire face à la pénurie d'énergie grâce à l'algorithme de gestion de l'énergie du système multi-niveaux proposé. L'application des technologies de l'information et de la communication (TIC), permet à l'ensemble des maisons intelligentes connectées dans un cadre de micro-réseau de contribuer à l'émergence du concept IoSGT « Internet of Sustainable Green Things ».

L'urbanisation du monde a commencé à retenir l'attention des chercheurs, notamment en ce qui concerne les applications qui sont lui associés. En 2014, plus de 54 % de la population mondiale vit dans des zones urbaines, et les statistiques estiment que ce pourcentage passera à 72 % en 2050. En conséquence, la demande d'énergie sous toutes ses formes augmente proportionnellement [ZHA16 et MAD11]. Par conséquent, les pays dont les sources d'énergie ou les importateurs de substances primaires sont limités doivent être en mesure de répondre sérieusement à ces défis. Donc, la notion émergente de "villes intelligentes" commence à prendre tout son sens [CAM19 et GIR17].

La plus grande concentration a été prise par le secteur de l'électricité, considéré comme le principal consommateur de sources d'énergie dans les zones urbaines. Cela pousse les urbanistes à réorienter l'intelligence de la ville vers les villes énergétiques intelligentes. Au cours des décennies, la production d'électricité a connu plusieurs évolutions, passant d'une énergie décentralisée à une énergie centralisée et arrivant à une énergie distribuée avec l'intégration de sources renouvelables [ZHO16]. L'intégration des sources d'énergie renouvelables a été considérée comme une option alternative utilisée par les gouvernements au lieu de moderniser les centrales électriques traditionnelles. Cela est dû à la disponibilité des sources d'énergie renouvelables et à leurs avantages, notamment la rentabilité, l'inépuisabilité et la réduction des émissions de gaz à effet de serre [ADE19]. Cependant, l'intermittence

est la contrainte majeure. En conséquence, l'utilisation de différentes sources de production renouvelables sur un seul point commun représente une meilleure solution pour une unité de production renouvelable continue, moins coûteuse et plus efficace en termes d'espace. Les systèmes hybrides d'énergie renouvelable (HRES) sont considérés comme une combinaison de différentes sources, à condition qu'ils respectent la contrainte de complémentarité [KAR19]. Parmi les sources d'énergie alternatives, on trouve l'énergie solaire et éolienne avec le potentiel de faisabilité requis, en particulier le cas d'un système hybride PV-éolien avec un stockage sur batterie, qu'il soit connecté ou non au réseau [KHA18]. Le dimensionnement est le point de départ d'une hybridation optimale en termes de capacité et de coût, c'est pourquoi plusieurs travaux ont été axés sur le développement de méthodes de conception optimisées [LIA19]. L'optimisation d'un système de production est également liée à la surface du point de fonctionnement, qui est essentiellement basée sur le Maximum Power Point Tracking (MPPT). Dans ce contexte on trouve plusieurs méthodes que les chercheurs comparent constamment entre elles pour choisir la meilleure adaptée à une application donnée, tant pour l'éolienne [KUM16] que pour l'énergie photovoltaïque [CHA191], [MOT19]. Même l'application de ces technologies fait progresser les performances du système ; la question du système de gestion de l'énergie reste une préoccupation indispensable pour les chercheurs [OLA16]. Pour cette importance, plusieurs études ont été réalisées par des chercheurs intéressés par le domaine des économies d'énergie, notamment dans le contexte de la domotique intelligente [SHA18] ou des systèmes d'énergie distribués [ALA19]. D'autres ont discuté de la gestion de l'énergie basée sur le concept de l'internet de l'énergie [HAN18]. Cette dernière notion a été évaluée comme la future génération qui vient avec la combinaison de la structure du réseau intelligent à l'internet des objets qui augmenteront encore plus l'optimisation de l'énergie. De même, tout système hybride conçu pour la production d'électricité est censé contrôler la consommation d'énergie de ces sources et gérer son excédent d'énergie. En fait, les auteurs ont [CHA201] développé une architecture hybride modulaire qui est gérée par une gestion intelligente de l'énergie basée sur la récupération de l'énergie du réseau pour un système PV-Batterie. Le même concept a été développé pour un système hybride PV-éolien-batterie dans [CHA192] et une combinaison de la dynamique de charge a été bien décrit par [CHA202]. Dans [LUN17], les auteurs ont proposé un modèle considéré comme un système de gestion déterministe pour une configuration hybride PV-éolien-batterie connectée au réseau. D'une manière générale, le problème est présenté comme un système général de programmation linéaire mixte résolu afin de réduire les coûts de fonctionnement du système. Pour le même système hybride dans son cas autonome, les auteurs ont proposé un algorithme de gestion de l'énergie basé sur la catégorisation des charges en fonctionnement normal, la priorité du système de stockage en cas de manque d'énergie, et l'utilisation de charges de décharge en cas de surplus [KUM15]. L'hybridation peut même être appliquée au système de stockage [AKT18]. Sur la base du système de stockage, l'énergie d'un système photovoltaïque a été gérée en fonction d'un système de contrôle qui prend en compte l'état de charge de la batterie et l'ultra-capacité. Les auteurs dans [XU18] ont également supposé que les systèmes de stockage de l'énergie des batteries constituaient un état de production distribuée au sein des micro-réseaux et ont proposé une stratégie de contrôle et de gestion de l'énergie pour maintenir un équilibre entre l'offre et la demande.

En résumé, ce chapitre se distingue des travaux présentés dans le tableau 26 par les nouveautés suivantes : i) Développement d'un algorithme permettant d'obtenir une topologie d'interconnexion optimisée entre les micro-réseaux afin d'augmenter la fiabilité de partage de l'énergie. ii) Analyse du partage de l'énergie entre cinq micro-réseaux, chacun est alimenté par une des configurations : Batterie PV, batterie éolienne ou batterie éolienne PV. iii) Organisation du système de gestion de l'énergie à trois niveaux, à savoir : Niveau des HRES, niveau de l'ordonnancement de la charge et niveau de partage de la communication entre les HRES.

Références	Système hybride envisagé	Stratégie	Configuration du bus	Contribution	Contraintes
[KUM15]	PV/éolien/batterie	Standalone	Bus DC	Un organigramme de gestion de l'énergie pour le système hybride étudié est élaboré. Le système utilise des charges de décharge pour l'énergie excédentaire et le délestage en cas de pénurie.	Valeurs de la puissance solaire, éolienne, de la charge et de l'état de charge des batteries (SOC)
[NIK15]	PV/ éolienne/micro-turbine / pile à combustible/ générateur de chaleur et d'électricité combiné	Connecté au réseau	Non spécifié	Sur la base d'une modélisation probabiliste de la production d'électricité et de la demande de charge, les auteurs ont développé une nouvelle stratégie de gestion basée sur l'exploitation économique qui a été formulée et résolue comme un problème d'optimisation.	Coûts de l'unité de puissance, coûts d'exploitation et de maintenance et coûts des puissances vendues et achetées.
[AKT18]	PV/Batterie/Ultra-condensateur	Connecté au réseau	Bus hybride DC/AC	Sur la base d'un algorithme heuristique basé sur des règles, les auteurs ont proposé une gestion dynamique de l'énergie, en particulier pour les systèmes de stockage hybrides. Le système commence par décider du mode de charge ou de décharge de la batterie avant de contrôler le système renouvelable.	État de charge de la batterie, valeurs de la puissance PV et de la charge.
[SAR19]	PV/Éolien/ Biomasse et batterie de flux redox au vanadium (VRFB)	Connecté au réseau	Bus AC	Un algorithme de gestion basé sur des règles développé pour satisfaire la gestion de la demande, l'écrêtement des pics de consommation et assurer une probabilité de perte nulle de l'alimentation électrique au niveau de la distribution.	Valeurs de la puissance PV, de la charge, du biogaz et du VBFB
[KHA19]	Batterie PV/ Diesel/ Hydrogène	Standalone	Bus AC	Sur la base d'automates finis, les auteurs ont proposé un système de gestion de l'énergie optimisé qui divise le système en sous-systèmes plus petits et réduit le temps de calcul puisque la transition d'état pour chaque sous-système se fait en parallèle.	PV, charge, diesel, valeurs de puissance des piles à combustible et batterie, état du stockage de l'hydrogène.
[LIU19]	Batterie PV	Connecté au réseau	Bus DC	En utilisant la catégorie d'heure (Vallée, Plat, Sommet) et le type de jour (Jour de la semaine/Weekend) les auteurs ont présenté et la stratégie de gestion de l'énergie pour contrôler le système étudié.	Le vieillissement des cycles de batterie, le soulagement du réseau et la tarification en fonction de l'heure locale d'utilisation.
[KAD19]	DFIG Éolienne / Pile à combustible / Supra-condensateur	Connecté au réseau	Bus DC	Le système repose sur une nouvelle topologie des trois sources. La stratégie de gestion de l'énergie est basée sur la connexion au réseau en excédent ou en déficit	Valeurs de puissance des piles à combustible, des éoliennes DFIG et des supercondensateurs.
[NOG19]	PV/Éolienne/batterie	Standalone	Bus DC	Les auteurs ont développé cinq modes de fonctionnement du système en utilisant un diagramme schématique à états finis et les transitions ont été effectuées par un système non linéaire commuté.	État de charge de la batterie, vitesse angulaire et courant dans l'espace (d-q).
[HAK19]	Générateur de chaleur et d'électricité combiné/ Eolienne/ Batterie	Off-Grid	Non spécifié	Une gestion de la consommation d'énergie qui prend en compte les charges thermiques et électriques de la maison, puis corrige la pénurie d'énergie d'une maison par l'échange d'énergie entre bâtiments intelligents en mode hors réseau.	Augmenter la satisfaction de l'utilisateur et réduire l'électricité achetée sur le réseau.

Tableau 26 étude comparative des architectures d'hybridation énergétique

II. Architecture proposée

Nous considérons un ensemble de cinq maisons, chacune équipée de son propre système de production hybride renouvelable, et de son propre système de gestion de l'énergie, que ce soit pour la programmation de la charge ou les sources d'énergie. Ce système de gestion de l'énergie pourrait être renforcé par une stratégie de gestion niveau du micro-réseau, où l'ensemble de ces maisons sont connectées pour partager le surplus et satisfaire leurs cas de pénurie d'énergie, de sorte que chaque maison contrôle ses cas de surplus et de pénurie d'énergie. Le micro-réseau est constitué de ces maisons reliées entre elles afin de partager des informations ou de l'énergie. Ainsi, le micro-réseau formé pourra

se connecter ou se déconnecter du réseau électrique national. La probabilité que le micro-réseau manque d'énergie est égale à $1/n$ fois la probabilité qu'une seule maison manque d'énergie, où n est le nombre de maisons contribuant au micro-réseau. La topologie en maille est la structure la plus efficace, et elle encourage de plus en plus la notion de partage de l'énergie selon une approche peer-to-peer. L'inconvénient de cette topologie, est le coût dans le cas où le nombre de maisons augmente.

Dans ce cadre, nous proposons un algorithme capable de relier un ensemble de points dans un espace 2D reflétant la dispersion de la production distribuée dans le micro-réseau. Ceci facilitera davantage l'installation électrique qui sera choisie par les futurs réseaux intelligents afin d'assurer le partage de l'énergie entre les maisons. Chaque maison est considérée comme une source d'énergie potentielle pour son voisin. Nous devons d'abord développer l'architecture électrique du réseau de partage. Tous les HRES sont simulés comme des points spatiaux dans l'espace 2D présentés dans la figure 69. L'idée est de relier l'ensemble des points intermédiaires de manière optimale. Le graphique final sera la topologie finale de l'architecture.

Nous prenons en considération le fait que la distance entre les points $P_i(x_i, y_i)$ et $P_j(x_j, y_j)$ est la distance définie dans un plan cartésien qui correspond à la longueur du plus petit segment reliant les deux points. Notre algorithme commence par classer les points dispersés dans l'espace de gauche à droite, en suivant un ordre croissant de l'axe des x . La classification se fait selon Eq. (60), où $card(HRES)$ représente le nombre total de maisons ou de HRES pris en compte dans cette étude, $\min_i x_i$ et $\max_i x_i$ représente le minimum $y_i(\min_i x_i)$ et le maximum de x dans la position du vecteur VP, respectivement et $y_i(\max_i x_i)$ représente les valeurs correspondantes de l'axe des y du $\min_i x_i$ et $\max_i x_i$ respectivement.

$$VPO = \left(\min_i x_i, \dots, \max_i x_i \right) / i \in \llbracket 1, card(HRES) \rrbracket \quad (60)$$

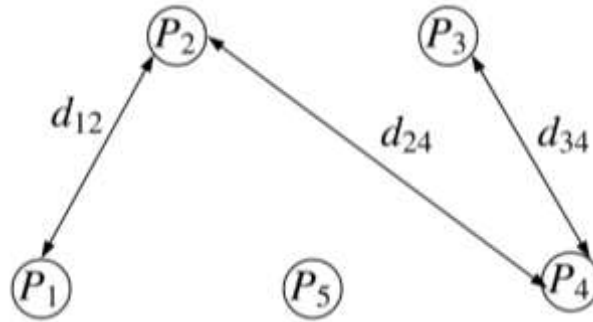


Figure 61 La répartition de cinq maisons dans l'espace 2D

Notant que la distance entre deux points P_i et P_j dans l'espace 2D est définie comme suit.

$$d(P_i, P_j) = d_{ij} = \sqrt{(x_j - x_i)^2 + (y_j - y_i)^2} \quad (61)$$

Cette définition de la distance nous aide à calculer la matrice de distance MD entre chaque deux points ou entre chaque deux HRES et à remplir la matrice de distance de l'algorithme.

$$MD = \begin{bmatrix} 0 & d_{12} & \dots & d_{1n} \\ d_{21} & \ddots & \dots & \vdots \\ \vdots & \dots & \ddots & d_{(n-1)n} \\ d_{n1} & \dots & d_{(n-1)n} & 0 \end{bmatrix} \quad (62)$$

Une fois que la matrice de distance est remplie, l'algorithme continue le processus vers l'assignation des données de la matrice d'interconnexion MR. En fait, VP est un vecteur de position des maisons sur le plan 2D. Il s'agit d'un vecteur à deux lignes, la première ligne pour les valeurs de l'axe des x et la deuxième ligne pour les positions de l'axe des y. Le nombre m est le nombre total de foyers étudiés sur le plan 2D. Pour la partie classification, l'algorithme réorganise les positions des maisons de gauche à droite de la valeur ascendante de l'axe des x. La classification se fait en identifiant le minimum de x de manière itérative. Une fois identifié, il est stocké à la position appropriée sur VPO et remplacé son ancienne valeur sur le vecteur VP par un Inf pour l'éliminer à l'itération suivante, où $VPO1_j$ est la ligne d'axe x pour les différentes maisons j et $VPO2_j$ est la ligne d'axe y pour les mêmes maisons.

Pour le processus de matrice de distance MD , l'algorithme affecte toutes les distances entre deux maisons i et j dispersées dans l'espace 2D d'étude en utilisant l'équation Eq. (61). MDi_j est la distance entre les deux maisons i et j . MR est la matrice d'interconnexion, où MRi_{i+1} prend 1 si les deux maisons adjacentes i et $i+1$ sont autorisées à être connectées ou 0 sinon.

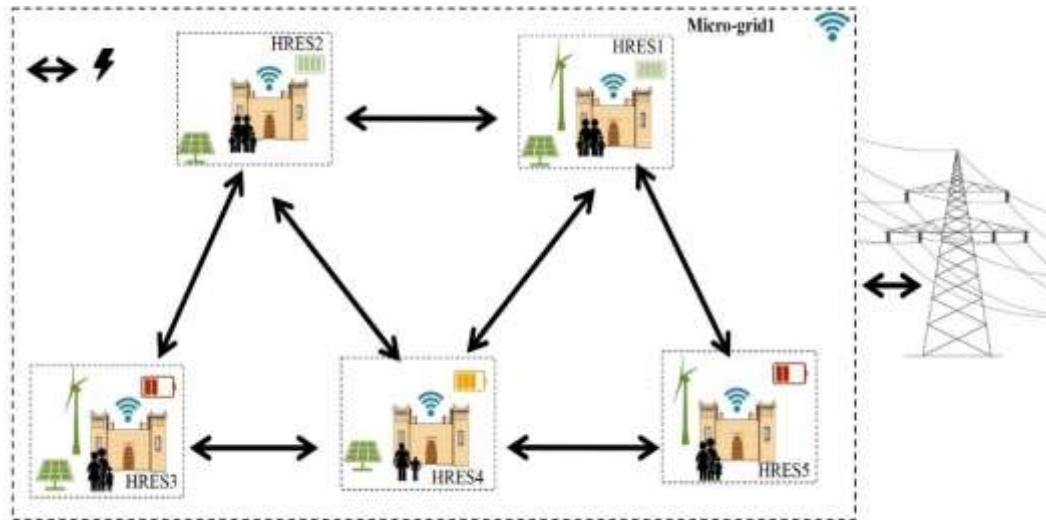


Figure 62 La topologie d'interconnexion globale

La topologie d'interconnexion proposée nous permet de réaliser une communication peer-to-peer et une distribution électrique efficaces. De plus, la proposition est moins complexe que l'architecture totale en maille car elle nécessite moins de liens entre les maisons par rapport à la topologie en maille bien connue. Les pertes de transmission seront considérablement réduites, surtout si on les compare à l'énergie perdue lors d'une communication entre deux maisons limitrophes sur une architecture radiale. Dans ce cas, la proposition est plus fiable, ce qui est une exigence pour les architectures de réseau intelligent, car chaque maison est au moins reliée par deux bords. Par conséquent, la défaillance d'une seule liaison n'entraînera pas la perte de la continuité du partage de l'énergie.

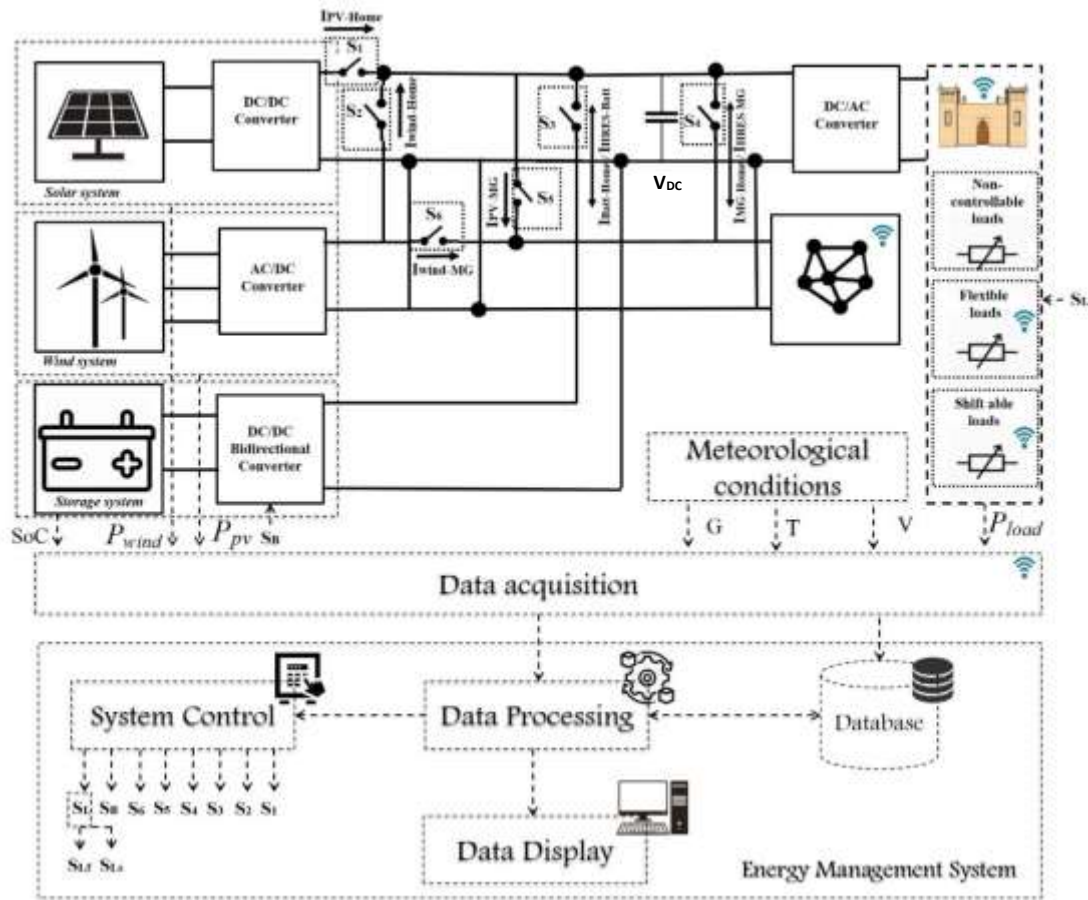


Figure 63 Configuration proposée pour une batterie éolienne PV connectée au réseau en interaction avec son réseau de voisinage intelligent

III. Modélisation

Un système HRES est caractérisé par une configuration qui repose essentiellement sur son application. Son optimisation est basée sur certains critères, à commencer par l'étude de faisabilité technique, en passant par le dimensionnement et enfin par la gestion et le contrôle optimal de l'énergie [KHA16]. Dans notre cas, la configuration doit permettre l'interactivité avec les maisons voisines ; nous avons donc proposé la configuration présentée dans la figure 71. L'architecture proposée comprend le système solaire comme source primaire, l'éolienne comme source secondaire et ensuite un système de stockage par batterie. En outre, le système interagit avec d'autres unités de production hybrides du micro-réseau des maisons connectées. La tension du bus CC de référence est déterminée en fonction du système de conversion CA, dans notre cas, il s'agit de l'onduleur monophasé connecté à la maison. La capacité du bus DC est dimensionnée en fonction de l'énergie provenant du système hybride local. Nous sommes intéressés par une configuration reconfigurable, flexible, capable de se connecter et de se déconnecter du réseau sans problème de synchronisation des sources. À cet égard, nous adaptons une configuration basée sur un bus DC. L'énergie produite par chaque source est convertie en forme continue grâce à l'application de systèmes électroniques de puissance appropriés. Le système de base pour chaque HRES est la batterie PV, mais l'aspect flexibilité de la configuration proposée permet à d'autres HRES d'accueillir une troisième source, supposée être une éolienne. Cette dernière pourrait être remplacée par

toute autre source, il suffit de tenir compte de sa disponibilité en termes de potentiel renouvelable, et des coûts de mise en œuvre et de fonctionnement. À côté de la configuration de l'architecture électrique, on trouve le système de contrôle et de gestion. A cet effet, les connecteurs présentés par S_i représentent les points de contact qui aident à l'alimentation électrique des charges. La gestion est effectuée par un système composé d'un traitement de données et d'un système de prise de décision pour l'affectation des états "Off" et "On" aux interrupteurs. Sinon, la classification des charges a fourni une solution pour la gestion des états critiques.

1. Installation photovoltaïque

Le potentiel solaire en Afrique, et en particulier dans le Nord, est assez important. La disponibilité de l'énergie solaire est très encourageante pour adopter et renforcer le réseau électrique conventionnel avec des énergies renouvelables [ZHA18]. Pour modéliser la cellule solaire, un circuit électrique équivalent est nécessaire. A cette fin, l'analogie peut être faite avec une diode double ou simple [TAM16]. La modélisation mathématique tenue par ce travail est conduite selon le circuit à une seule diode.

En appliquant la loi de Kirchhoff, nous obtenons l'Eq. (63), qui est la somme des courants circulant dans chaque branche du circuit,

$$I_{pv} = I_{ph} - I_D - I_p \quad (63)$$

où, I_{pv} est le courant photovoltaïque produit par la cellule PV, I_{ph} est le photo-courant généré par la cellule, I_D est le courant qui circule dans la diode [ALR13] et I_p est le courant qui passe par la résistance parallèle R_{sh} qui représente les courants de fuite de la cellule solaire ou de l'ensemble du panneau photovoltaïque. Le photo-courant est le paramètre qui est le plus influencé par les conditions météorologiques, à savoir : l'irradiation et la température, telles que décrites par Eq. (64), lorsque G et T sont l'irradiation et la température ambiante, G_n et T_n sont l'irradiation et la température dans des conditions normales (1000W/m², 25°C). J'en prends note, q (1.6021646×10⁻¹⁹C) la charge de l'électron, K_B (1,3806503×10⁻²³J/°K) la constante de Boltzmann, n est le facteur d'idéalité de la diode, généralement compris entre [1, 2] et N_s est la série de cellules connectées sur le panneau. I_{scn} est le courant de court-circuit de la cellule dans des conditions de test standard μ_i est le coefficient de variation du courant de court-circuit.

$$I_{ph}(G, T) = \frac{G}{G_n} (I_{scn} + \mu_i(T - T_n)) \quad (64)$$

Pour une installation de panneaux N_{ss} en série, N_p se ramifie en parallèle, on suppose le courant généré par l'installation selon le PV idéal,

$$I_{pv} = N_p \left(\frac{G}{G_n} (I_{scn} + \mu_i(T - T_n)) \right) - \frac{N_p (I_{scn} + \mu_i(T - T_n))}{\exp \left(\frac{q(V_{ocn} + \mu_v(T - T_n))}{nN_sK_B T} \right) - 1} \cdot \left(\exp \left(\frac{qV_{pv}}{nN_{ss}N_sK_B T} \right) - 1 \right) \quad (65)$$

Où, V_{ocn} représente la tension en circuit ouvert et μ_v est le coefficient de variation de la tension en circuit ouvert. La puissance qui sera produite par l'installation solaire est le courant I_{pv} multiplié par la tension aux bornes de l'installation V_{pv} . Pour notre système, l'électricité produite par la centrale P_{pv} photovoltaïque sera soumise à des pertes de traitement, traduites par le rendement du convertisseur $\eta_{DC/DC}$ DC/DC, ce qui est clair par Eq. (66).

$$P_{pv}(t) = I_{pv}(t) \times V_{pv}(t) \times \eta_{DC/DC} \quad (66)$$

2. Éolienne : générateur synchrone à aimant permanent (PMSG)

La conception et le choix du modèle de système éolien sont très différents de ce qui est présenté par le système solaire. Pour un système de production d'énergie éolienne, la première étape consiste à choisir les composants respectifs de l'éolienne, en commençant par l'aérodynamique, la mécanique, le générateur électrique, puis la conception du système de contrôle [JAM17]. La sélection est faite de manière à minimiser les pertes en fonction des trois niveaux de conversion du système. Le paramètre le plus significatif pour la sélection aérodynamique est le coefficient de puissance [XIA13].

$$C_p(\lambda, \beta) = 0.517 \left(\frac{116}{\lambda + 0.08\beta} - \frac{4.06}{1 + \beta^3} - 0.8\beta - 5 \right) e^{\left(\frac{-21}{\lambda + 0.08\beta} + \frac{0.735}{1 + \beta^3} \right)} + 0.0068\lambda \quad (67)$$

Où β est l'angle de pas des pales, et λ est le rapport de vitesse de pointe, c'est-à-dire $\lambda = \frac{R\Omega}{V}$, avec R est la longueur des pales de l'éolienne, V est la vitesse du vent et Ω la vitesse de rotation de l'éolienne. Eq. (67) est développé pour les éoliennes tripales à axe horizontal, considérées comme la conception la plus efficace du point de vue aérodynamique. Ainsi, la puissance qu'une turbine peut extraire est toujours modifiée par le coefficient de puissance C_p ,

$$P_{wind}(\beta, \lambda, V) = \frac{1}{2} \rho S C_p(\lambda, \beta) V^3 \quad (68)$$

Où ρ est la densité de l'air et S la surface balayée par les pales. Pour le système d'énergie éolienne, l'énergie produite par le système passera par des transformations mécaniques et électromagnétiques, avant la conversion électrique au niveau du générateur. Pour une modélisation énergétique, la partie génératrice sera un lieu de pertes modélisé par le rendement η_g , d'autres pertes au niveau $\eta_{AC/DC}$ du convertisseur AC/DC sont également prises en compte lors de la modélisation et de la simulation.

$$P_{wind}(\beta, \lambda, V) = \frac{1}{2} \rho \times S \times C_p(\lambda, \beta) \times V^3 \times \eta_g \times \eta_{AC/DC} \quad (69)$$

3. Système de stockage de batteries

Plusieurs modèles d'estimation et de prédiction de la puissance des batteries ont été récemment mis au point pour des applications de gestion de l'énergie des batteries en temps réel [GHO15]. Le modèle électrique est la formulation mathématique qui fonctionne avec un circuit équivalent de la batterie en appliquant une force électromotrice en série avec une résistance interne pour un système équivalent simple, et un circuit RC parallèle pour un modèle basé sur Thevenin [PUT15]. Pour notre cas, nous prenons en considération le modèle équivalent qui considère le circuit d'une force électromotrice E_b en série avec la résistance interne R_{batt} de la batterie, n_b est le numéro de cellule, I_{batt} est le courant de la batterie et U_{batt} est la tension de la batterie. En appliquant la loi d'Ohm explique la dynamique de la batterie décrite par Eq. (70).

$$U_{batt} = n_b \times E_b \mp n_b \times R_{batt} \times I_{batt} \quad (70)$$

L'élément le plus significatif de l'état énergétique d'une batterie est l'état de charge (SoC), qui dépend essentiellement de la capacité de la batterie en C_{batt} ,

$$C_{Batt} = C_{10} \frac{1.67 \times (1 + 0.005 \times \Delta T)}{1 + 0.67 \times (\frac{I}{I_{10}})^{0.9}} \quad (71)$$

$$SoC = 1 - \frac{I_{batt} \times t}{C_{batt}} \quad (72)$$

Où ΔT est la température de la batterie, C_{10} la capacité nominale pour un courant nominal de I_{10} , avec t le temps de décharge à un courant de I_{batt} . Sinon, la puissance disponible dans un système de stockage par batterie, à chaque instant t , est définie comme :

$$\frac{dE_{batt}}{dt} = P_{batt} \quad (73)$$

Où E_{batt} se trouve l'énergie de la batterie et P_{batt} la puissance de l'énergie. Dans notre cas, le pas de temps est d'une heure, ce qui signifie qu'à chaque créneau horaire, l'énergie stockée dans la batterie est exactement la puissance disponible à chaque instant. Sinon, en fonction de l'énergie disponible dans le bus commun en tant qu'excédent ou énergie nécessaire, la variation de l'énergie dans le système de stockage est déterminée. Cette énergie peut être nulle, positive ou négative, ce qui signifie que la batterie est en veille, en état de charge ou de décharge respectivement. Ensuite, la variation de l'énergie de la batterie est estimée.

$$E_{batt}(t) = E_{batt}(t - 1) + \Delta E_{batt} \quad (74)$$

L'énergie produite par le système de batterie est sujette à des pertes, qu'elles soient internes ou lors de la conversion du système. Pendant la charge de la batterie η_{ch} , il faut s'attendre à des pertes et les estimer, sinon les pertes $(1 - \eta_{dis}) \times P_{batt}$ par décharge affectent également la fiabilité de la batterie. Le système de conversion affecte également les performances du système de stockage. Ce phénomène est pris en compte par notre simulation et est traduit par Eq. (75).

$$\Delta E_{batt} = \begin{cases} P_{batt} \eta_{ch} \eta_{DC/DC} & \text{during charge} \\ \frac{P_{batt}}{\eta_{DC/DC} \eta_{dis}} & \text{during discharge} \end{cases} \quad (75)$$

IV. Stratégie de gestion de l'énergie

La gestion globale du micro-réseau commence d'abord par la gestion de l'énergie dans les HRES et la programmation/décalage de ces charges, puis le lancement du partage de l'énergie entre HRES voisins pour compenser toute pénurie d'énergie dans chaque maison du micro-réseau construit. Le réseau de consommation d'électricité que nous proposons est basé sur trois niveaux, à savoir : les HRES, le découpage et le déplacement de la charge et les niveaux de micro-réseau. Au niveau de la programmation et du déplacement de la charge, nous contrôlons les charges pour faciliter la réponse et la gestion de l'équilibre de la demande. L'échelle HRES représente l'interaction du système renouvelable avec le stockage et les charges internes à l'intérieur du bâtiment. Enfin, le niveau du micro-réseau gère l'interaction et le partage de l'énergie entre les HRES, c'est-à-dire les bâtiments renouvelables.

1. Niveau de gestion des HRES

Le système de gestion de l'énergie que nous proposons à ce niveau vient résoudre la question de l'approvisionnement énergétique d'une architecture hybride PV-éolien-batterie en tant qu'unité globale. L'organigramme présenté à la figure 72 prend en considération le HRES étudié ainsi que ses interactions avec le voisinage. On note que, P_{wind} est l'énergie totale produite par l'éolienne, PPV l'énergie extraite de la centrale PV, P_{load} l'énergie demandée par la maison qui est la somme des énergies demandées par chaque charge installée à l'intérieur de la maison. P_{grid} est l'énergie qui pourrait être demandée par d'autres maisons du micro-réseau développé, P_{inject} est le surplus d'énergie injecté dans le micro-réseau, PHR est l'énergie renouvelable disponible qui représente la somme de l'énergie produite par l'éolienne et la centrale photovoltaïque. Si est le total des interrupteurs installés dans l'architecture locale et SL les interrupteurs de charges.

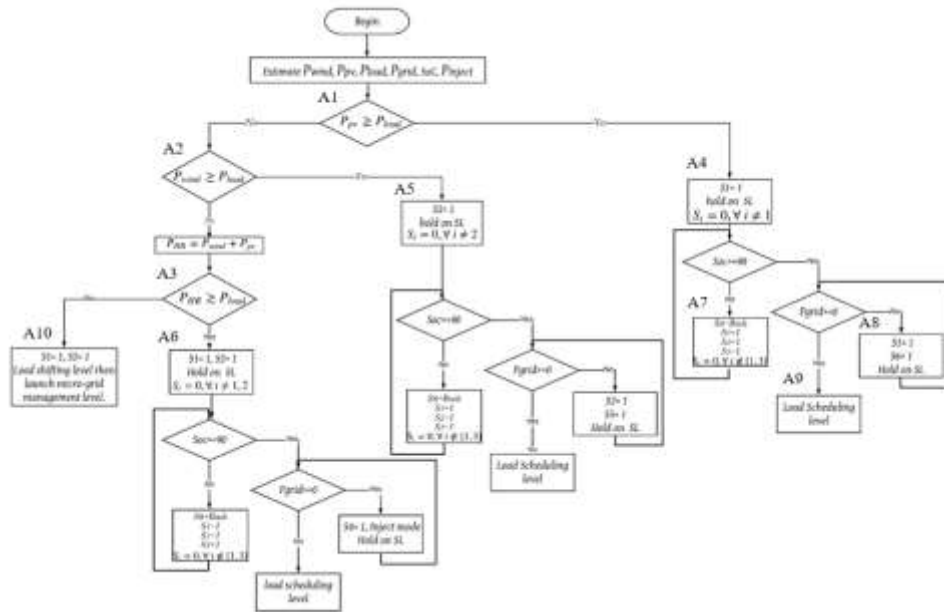


Figure 64 Système de gestion de l'énergie PV-éolienne-Batterie (HRES) connectée au réseau, en interaction avec son micro-réseau

L'algorithme de gestion commence par tester si la consommation de courant de la maison est inférieure à la production directe du système solaire, puis de l'éolienne, sinon du système hybride PV-Eolien (A1, A2, A3). Si c'est le cas, c'est-à-dire si la production renouvelable directe de la SIRH est supérieure à la demande d'énergie de la maison, le système active les interrupteurs qui correspondent à la source disponible capable de répondre à la demande actuelle (A4, A5, A6). De cette façon, la demande d'énergie est entièrement satisfaite.

En cas de surplus d'énergie produite, le système commence par stocker l'énergie dans les batteries si leur état de charge est inférieur à 90% (A7). Si ce n'est pas le cas, et que le système produit de l'énergie avec un excès et que les batteries sont déjà à 90%, le système de contrôle examine l'état de charge des maisons du quartier, s'il y a une maison en pénurie, ce qui se traduit par $P_{grid} < 0$, le système injecte de l'énergie pour collaborer avec son micro-réseau (A8). Le système peut aussi lancer l'algorithme pour le niveau de planification de la charge (A9) ; le même niveau est lancé aussi pendant les pénuries (A10).

2. Niveau de programmation / décalage de la charge

Pendant la programmation de la charge, le système commence à prévoir l'énergie demandée par les charges flexibles P_{loadf} pour le créneau horaire suivant (B1). Si l'une d'entre elles nécessite une énergie inférieure ou égale à l'excédent produit, elle sera programmée pendant la tranche horaire en cours et annulée pendant la tranche horaire suivante (B2). Si l'excédent produit ne peut être injecté dans le micro-réseau ou compensé par les charges flexibles du créneau horaire suivant, il sera stocké dans les batteries jusqu'à 100% (B3) et le reste sera soit collaboré avec les systèmes de stockage voisins (B4), soit injecté dans le réseau (B4).

Dans le pire des cas de production, c'est-à-dire lors du déplacement de la charge, le système commence à décharger les accumulateurs jusqu'à un état de charge minimal (B8). Dans les cas critiques, le système commence à diminuer les charges réductibles P_{loadr} jusqu'à une consommation de 85% (B7), cette catégorie représente les charges flexibles en termes de puissance comme la climatisation. Si même avec cette réduction, la maison est toujours en pénurie, le système de gestion déplace alors les charges secondaires (B9). Sinon, la maison déclare à son voisinage un état de pénurie, et prend l'énergie du micro-réseau (B10). Sinon, l'énergie achetée au réseau de distribution ne sert qu'à alimenter ses charges critiques, où, P_{lack} est l'énergie manquante, P_{disp} est l'énergie disponible dans le système de stockage, P_{HRES} est l'énergie de l'ensemble des HRES installées dans la maison, SB est l'interrupteur du système de stockage des batteries et $Card(MG)$ est le nombre de maisons collaborant à l'intérieur du micro-réseau.

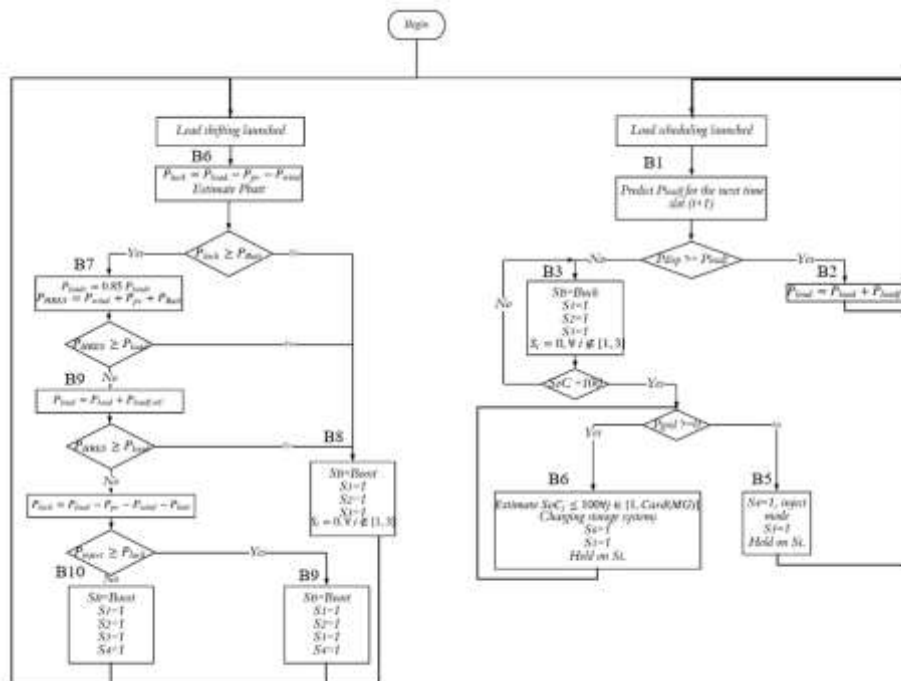


Figure 65 Système de gestion de l'énergie pour le niveau de programmation/décalage de la charge

3. Gestion au niveau des micro-réseaux

Une fois que l'infrastructure optimale du système est développée, le micro-réseau composé de ses HRES tente d'assurer un équilibre énergétique, $_{PMG}$, entre ses maisons constitutives, (C4) et à cette étape, le troisième niveau, celui du micro-réseau, de gestion de l'énergie est lancé. L'énergie disponible à partager par une $HRES_i$ est présentée par Eq. (76). Notant que si l'un des HRES ne contient pas une certaine

source d'énergie renouvelable, il sera remplacé par un zéro dans l'équation énergétique qui lui correspond.

$$P_{HRES_i} = P_{pv_i} + P_{wind_i} - P_{load_i} - (1 - SoC_i)P_{batt_i} \quad (76)$$

Ainsi, l'équation de la contrainte d'équilibre que la micro-réseau doit satisfaire la plupart du temps est présentée comme suit.

$$P_{MG} = \sum_{i=1}^n P_{HRES_i} \geq 0 \quad (77)$$

Une fois que le statut énergétique du système est déclaré par le HRES, et lorsqu'il s'agit d'une pénurie, le système de gestion décide de la maison avec le surplus énergétique le plus proche selon le vecteur de classification de l'OPV. Une fois l'information disponible, le système réduit la matrice de recherche à la taille qui correspond à la SEHR en pénurie (C3) comme point d'arrivée de l'énergie et à la SEHR excédentaire la plus proche comme point de départ de l'énergie. Ensuite, en comparant les poids de chaque chemin reliant les deux points, le système prend le chemin correspondant au plus petit poids (C5).

Sinon, s'il s'agit d'un HRES avec un surplus d'énergie, il prendra en compte les maisons avec un manque de production d'énergie renouvelable, sauf que le HRES que leur système de stockage n'est pas à un état de 100%. Dans les cas d'équilibre, le micro-réseau se connecte au réseau pour injecter de l'énergie dans le réseau d'utilité publique, qui pourrait être utilisé pour desservir les micro-réseaux de quartier de même architecture.

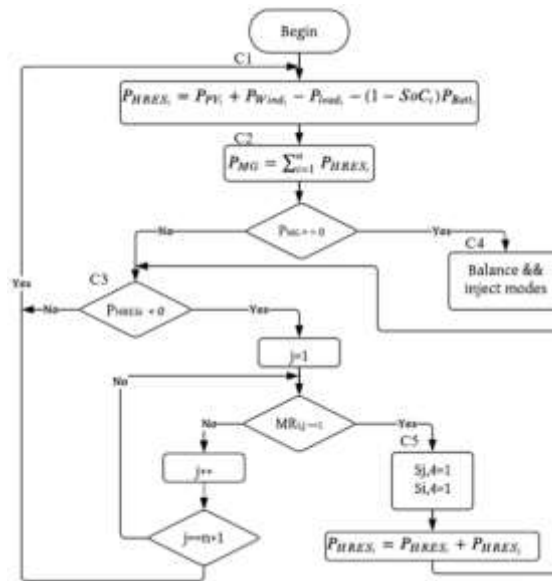


Figure 66 Système de gestion de l'énergie au niveau de micro-réseau

4. Gestion énergétique d'un HRES à l'intérieur d'un micro-réseau

Le système énergétique proposé est simulé sur une machine à états finis présentée à la figure 8. Notre système de gestion est flexible et peut être adapté à six états ou modes d'énergie, à savoir Équilibre (B), manque d'énergie ou partage négatif (NS), excès d'énergie ou partage positif (PS), stockage (S), restauration (R), ou déplacement de charge/planification (LS). La transition interétatique est assurée en

comparant l'énergie produite et consommée par la même SDE ainsi que les états énergétiques des SDE voisines. Le système commence par s'assurer que le système hybride PV-Wind est capable de fournir de l'électricité directe à toutes les charges de la maison, en donnant la priorité au système solaire. En cas de surplus d'énergie, le système estime d'abord l'énergie stockée dans la batterie pour décider s'il faut stocker ou partager l'énergie qui est faite pour le HRES le plus proche dans le besoin. Sinon, si le système est en pénurie, notre système commence par estimer si le système de stockage est capable de satisfaire la demande de charges. Le système commence par réduire et déplacer les charges flexibles, représentant les charges de deuxième priorité, avant de déclarer son état de pénurie aux HRES voisins pour fournir ses charges critiques instantanées. Pour faciliter la modélisation du système par l'automate à états finis, nous créerons des états symboliques pour chaque transition. Le tableau 27 présente un résumé pour chaque possibilité. Notant que l'automate a un état d'équilibre qui passe comme un état de transition entre deux autres états. En outre, il existe des transitions impossibles telles que : du partage négatif au partage positif ou du partage négatif au délestage. Chaque transition vers un État a son retour, s'il n'est pas direct ; il se fait indirectement par l'État d'équilibre.

$\exists j / PHRES^j \leq 0$, $\nexists j / PHRES^j \leq 0$ présente qu'il y a une maison dans le micro-réseau qui a besoin d'énergie ou qu'il n'existe aucune maison qui demande de l'énergie, respectivement. Cependant, $PSL \neq 0$, $PSL = 0$ traduit qu'il n'y a plus de charge secondaire en fonctionnement ou vice versa, respectivement.

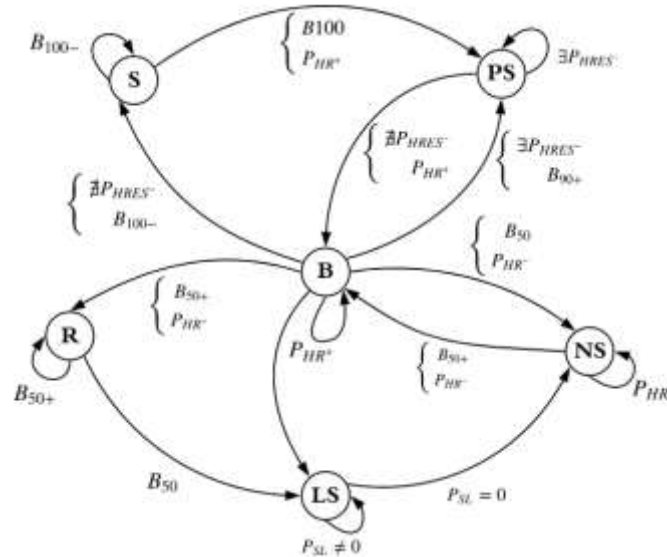


Figure 67 Diagramme d'automate à état fini de gestion d'énergie

Les transitions de charge des batteries		Transition des systèmes hybrides renouvelables		Transition des systèmes de charge		Partager les transitions du système	
$SoC = 100\%$	$B100$	$P_{HR} \geq P_{charger}$	P_{HR}^+	$P_{SL} \neq 0$	$P_{SL} \neq 0$	$\exists j / PHRES^j \leq 0$	$\exists PHRES^-$
$SoC \leq 100$	$B100^-$						
$SoC \geq 90\%$	$B90^+$	$P_{HR} \leq P_{charger}$	P_{HR}^-	$P_{SL} = 0$	$P_{SL} = 0$	$\nexists j / PHRES^j \leq 0$	$\nexists PHRES^-$
$SoC \geq 50$	$B50^+$						
$SoC = 50$	$B50$						

Tableau 27 Résumé des transitions du système

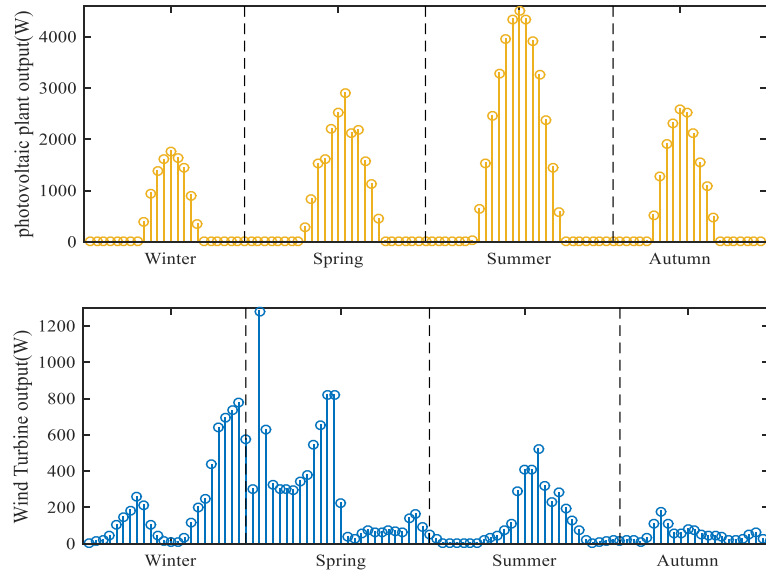


Figure 68 La puissance de l'installation PV et éolienne

V. Discussion

1. PV-Eolien-Batterie HRES en interaction avec son réseau de voisinage intelligent

Pour tester et valider l'algorithme de gestion de l'énergie proposé pour un système hybride PV-éolien-batterie en interaction avec son réseau de voisinage intelligent, un codage MATLAB détaillé a été développé. L'étude de faisabilité du site d'implantation est validée par le potentiel renouvelable important du territoire national [AZE18]. Dans notre étude, nous considérons les maisons traditionnelles marocaines à Marrakech, au Maroc. Selon l'AIE (Agence internationale de l'énergie) [IEA19], les statistiques de la consommation d'électricité par habitant montrent que la consommation moyenne d'un habitant en 2017 est d'environ 3 kWh. Si l'on ajoute à cela le nombre moyen de personnes par maison, estimé par le HCP (Haut Commissariat au Plan) [EVO20], une maison marocaine traditionnel consomme en moyenne 12 kWh d'énergie par jour, avec une famille moyenne de quatre personnes. En outre, les conditions météorologiques ont été obtenues à l'aide de TRNSYS pour la ville de Marrakech, au Maroc. En fonction de ce climat, la figure 76 montre l'installation photovoltaïque et la production éolienne pendant une journée normale de chaque saison de l'année.

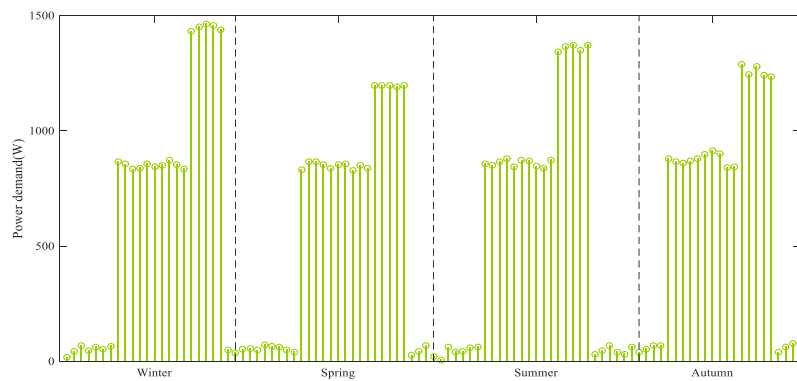


Figure 69 Demande d'électricité aléatoire pendant les jours typiques des saisons de l'année

La demande d'électricité de la maison varie aléatoirement de zéro à un maximum de 1500W, avec une demande maximale d'électricité située entre 18h et 21h. Nous classons les charges domestiques en trois

types : les charges fixes ou non contrôlables, les charges flexibles en termes de puissance, qui représentent les charges qui pourraient fonctionner à une puissance réduite en dessous du niveau de puissance maximum, ou les charges flexibles en termes de temps. Par conséquent, la demande de la maison, HRES1, est imitée selon la variation présentée dans la Fig. 77. Le système de gestion interne de la maison est toujours à l'affût de l'état des maisons de son quartier afin d'initier des collaborations énergétiques en cas de pénurie ou d'excédent. La figure 78 présente les données supposées pour l'état du réseau de voisinage qui introduit la demande énergétique des maisons de repos, HRES2-HRES5. Le système environnant est censé être constamment en demande d'énergie.

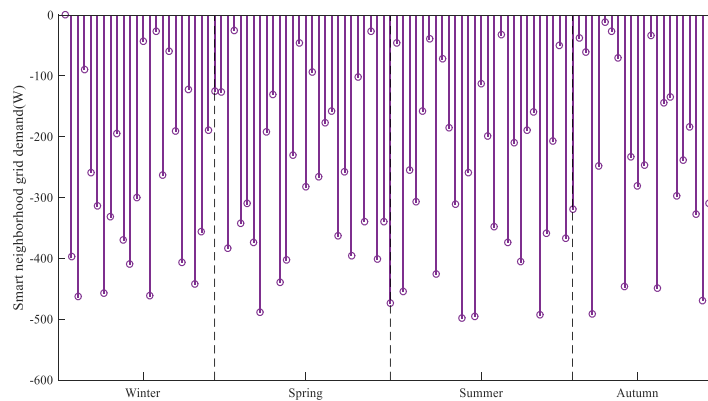


Figure 70 Demande du réseau électrique des HRES pendant les jours typiques de saisons de l'année

Les paramètres que le système est censé collecter sont l'énergie produite par le système solaire P_{pv} , l'énergie éolienne P_{wind} , l'énergie à consommer par les charges P_{Load} et l'énergie demandée par les autres HRES P_{grid} . Cependant, si la maison connaît une pénurie d'énergie, elle utilise son système de stockage de batteries. Si ce dernier ne peut prendre le relais parce que son état limite de charge SOC_{min} a été atteint, le système s'appuie sur son deuxième niveau de gestion énergétique. En fait, le système réduit d'abord ses charges flexibles en termes de puissance, puis déplace les charges secondaires. Après avoir lancé le niveau de gestion des décalages/planifications si le système est toujours en pénurie pour fournir ses charges critiques et principales, le système se réfère à son voisinage. Cette énergie sera une récupération soit de l'énergie préalablement partagée pour une utilisation directe, soit de l'énergie indirectement économisée dans le système de stockage voisin.

Nous constatons qu'il est très rare que la production se réfère à la demande exactement sans aucun excédent. Cependant, les exemples de la manière dont le système passe par ses états de gestion énergétique sont très clairs dans la figure 79. Les états de charge et de décharge de la batterie sont ceux indiqués par la **puissance de la batterie S/R** dans la figure. Le système passe clairement par ces modes pendant la journée, de sorte que les premières heures de la journée sont consacrées au stockage et les dernières heures à la récupération. D'autre part, le partage positif de l'**État PS** se fait surtout lors de l'excès d'énergie, qui se situe en milieu de journée et en présence d'irradiations et de la vitesse du vent à leur intensité maximale. Sinon, le partage négatif de l'**État NS** est toujours précédé d'un délestage de la **demande de puissance LS** afin que le système ne consomme du réseau que l'énergie requise par ses charges critiques. Les interrupteurs du système présentés par s_i assurent la contribution au bus continu ou non pendant toute la journée. Les interrupteurs peuvent prendre deux états 1 ou 0, pour le fait de collaborer ou non ou même pour contribuer à l'alimentation électrique de la maison, à l'injection ou au stockage d'énergie qu'il soit interne ou collaboratif. On remarque presque une complémentarité entre l'état de la batterie et l'interaction du réseau électrique. En fait, si le système utilise la batterie pour alimenter ses charges, en cas de pénurie persistante, c'est le réseau électrique qui l'alimente. De plus, si la batterie est capable de couvrir la demande, le réseau électrique est en mode veille. Toutefois, on note également une complémentarité entre S1 et S5, S2 et S6. Cela implique que la source renouvelable ne

peut pas collaborer dans le bus et injecter l'énergie dans le réseau séparément ; cela vaut aussi bien pour le système solaire que pour le système éolien.

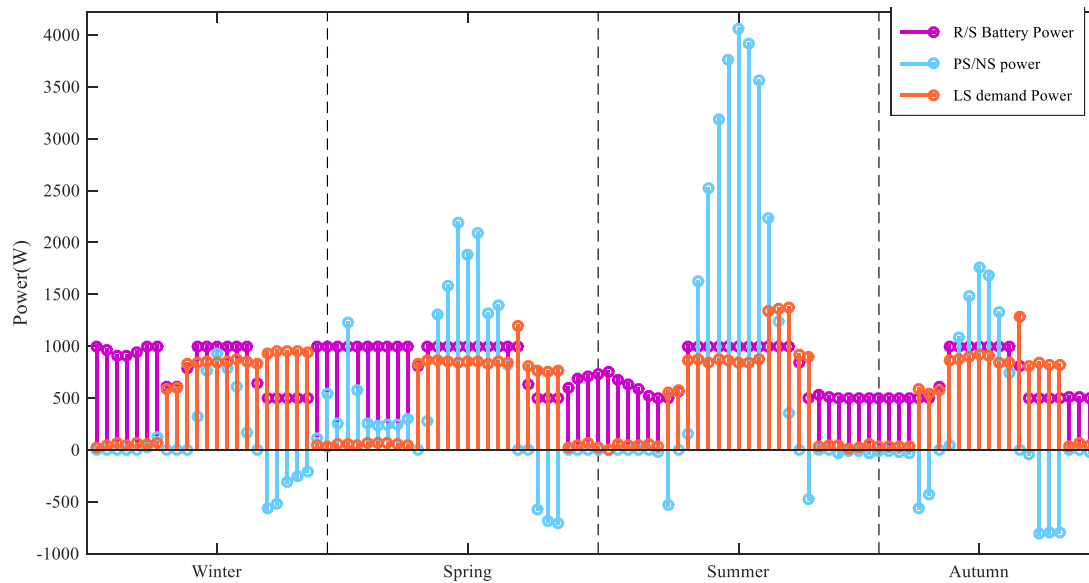


Figure 71 Gestion de l'énergie sur une journée régulière de chaque saison de l'année pour une maison équipée d'un système hybride connecté au réseau

2. Partager l'énergie et la communication Les HRES de l'ensemble du micro-réseau

Nous avons considéré le groupe de maisons sont reliées entre elles par la topologie de configuration proposée pour partager l'excès d'énergie entre elles. Le micro-réseau établi est capable de se connecter ou de se déconnecter du réseau électrique. Ce dernier dépend de l'état énergétique de chaque HRES constituant le micro-réseau. Par ailleurs, notre contribution prend également en compte le contexte intelligent de ces HRES. Par conséquent, une fois que l'énergie est optimisée en fonction du niveau des HRES et du niveau de délestage/planification, le programme traite le partage de l'énergie au troisième niveau, qui est l'étape du micro-réseau avant d'injecter ou de demander de l'énergie au réseau national. Le troisième niveau d'optimisation énergétique prend en compte les collaborations entre les différentes RHES. Ces collaborations sont optimisées en termes de pertes de transmission grâce à notre architecture de connexion. Selon l'étude de cas considérée, la figure 80 simule la répartition de la demande d'énergie de chacune des cinq maisons de prosummateurs intelligents constituant le micro-réseau en fonction des saisons de l'année. L'axe des x présente les quatre jours réguliers des saisons de quatre ans, et l'axe des y simule la puissance demandée par chaque ménage.

La figure 81 représente l'excédent et la demande d'énergie (axe des y) des différentes HRES composant le micro-réseau après optimisation selon les deux premiers niveaux de l'algorithme de gestion de l'énergie, qui sont les HRES et le niveau 1 de déplacement de la charge/planification selon l'algorithme de gestion de l'énergie déjà proposée. La simulation prend également en compte les quatre jours de simulation considérés pour la figure 80. En fait, la maison déclare qu'elle est en pénurie d'énergie seulement si et seulement si sa source alternative n'est pas en mesure de couvrir ces charges critiques. Toutefois, la maison déclare son excédent d'énergie uniquement si le système de stockage est à son niveau de charge maximal, sinon aucune charge flexible en termes de temps de la tranche horaire suivante ne peut être couverte par l'excédent de la tranche horaire actuelle.

La partie la plus importante d'un système de gestion de l'énergie consiste à répondre à la demande pendant les périodes de pointe de consommation et à gérer l'énergie excédentaire. Des travaux récents ont traité de ces deux extrêmes de l'état énergétique des systèmes, que ce soit par l'injection dans le réseau et la demande ou par l'utilisation de charges de décharge et de délestage. Les contributions précédentes, axées sur l'optimisation énergétique dans le secteur résidentiel, ont porté soit sur l'optimisation de la consommation d'énergie, soit sur la gestion de la production d'énergie renouvelable. En général, l'excédent d'énergie était géré par injection directe dans le réseau, sinon la pénurie d'énergie était extrême en raison de la consommation d'énergie du réseau électrique. Par ailleurs, nous supposons que les cas d'excédent et de pénurie sont possibles quelle que soit leur probabilité de survenue. À cette fin, nous avons conçu des stratégies optimisées pour contrôler l'énergie produite par le système ainsi que pour résoudre les deux problèmes de surplus et de pénurie d'énergie dans le cas des systèmes hybrides renouvelables fournissant des charges résidentielles. Le système vient résoudre à la fois le problème du manque ou du surplus d'énergie par la flexibilité et la catégorisation des charges dans un même maison.

VI. Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons proposé un algorithme de gestion de l'énergie à plusieurs niveaux pour un micro-réseau. Le micro-réseau est construit avec une topologie architecturale entre cinq maisons de prosummateurs intelligents, qui sont chacune équipées d'un système hybride renouvelable. Les différentes sources d'énergie qui ont été prises en compte dans ce travail sont le photovoltaïque, le vent et les batteries. Ces sources ont été reliées dans une architecture hybride basée sur la configuration du bus DC. Nous avons considéré cette combinaison comme la source renouvelable d'une maison intelligente dans les futures villes intelligentes en tenant compte du potentiel renouvelable important. Nous avons remarqué que la connexion électrique entre ces types de maison pouvait constituer un micro-réseau capable de fonctionner en mode îloté et connecté au réseau. L'architecture d'une telle liaison à coût optimal figurait également parmi les contributions présentées dans ce document. En outre, une interconnexion topologique optimisée entre les HRES a été développée. Cela a permis à chaque maison du micro-réseau de mettre en œuvre le système de gestion de l'énergie développé qui était basé sur une optimisation énergétique à trois niveaux, à savoir HRES, décalage de la charge/planification et gestion de l'énergie du micro-réseau.

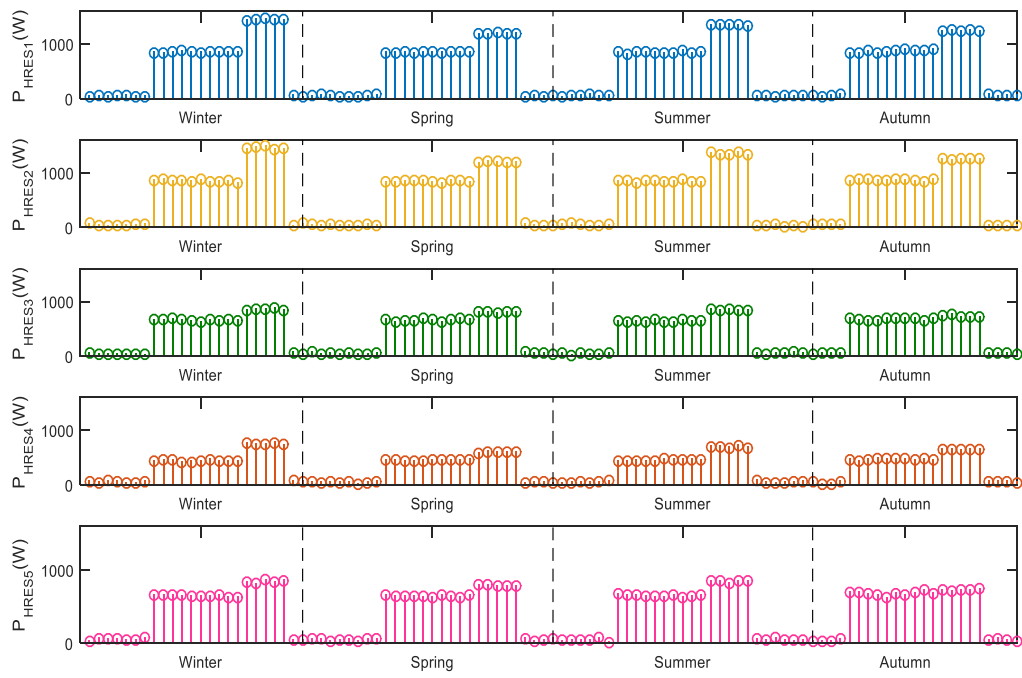


Figure 72 Demande de l'électricité pendant les jours typique de l'année pour cinq HRES

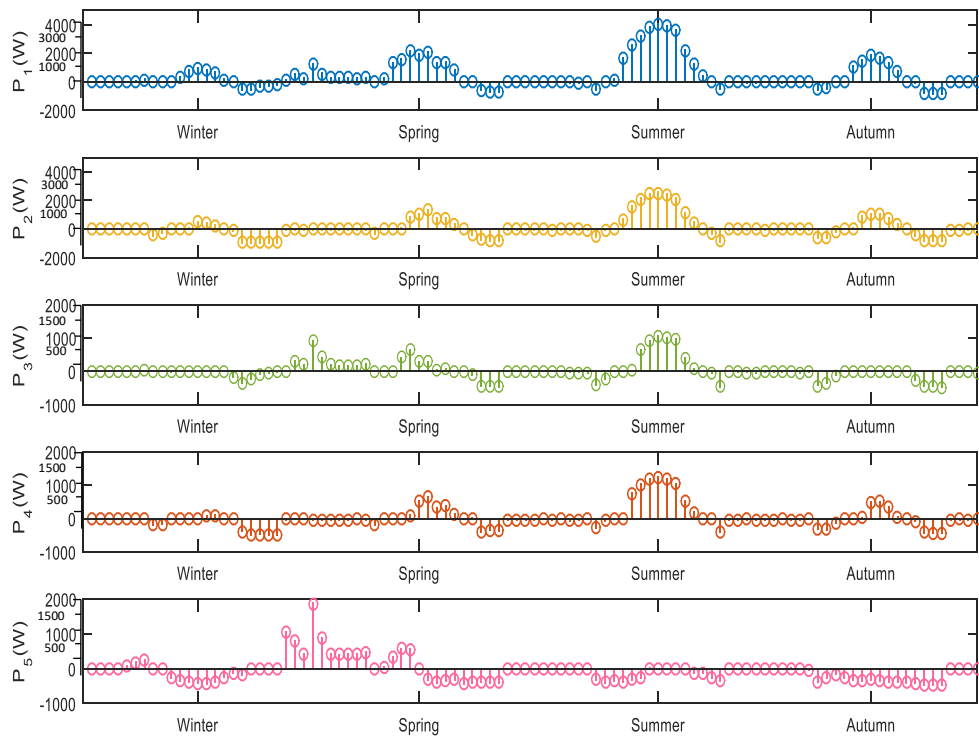


Figure 73 Partage de l'énergie de chaque HRES avec le consommateur d'énergie de son micro-réseau

Chapitre 4.2 Autosuffisance énergétique du bâtiment passif

I. Introduction

Aujourd'hui, le secteur du bâtiment offre en Afrique et plus particulièrement au Maroc un réel potentiel de développement. Les nombreux projets d'infrastructure et la lutte contre l'habitat indigne sont des signaux forts de l'engagement des autorités publiques dans la mise en place de structures qui soutiennent le développement durable, économique et social du pays. Ce secteur au Maroc représente environ 25% de la consommation totale d'énergie du pays, dont 18% pour le secteur résidentiel et 7% pour le secteur tertiaire [AME19]. Cette consommation d'énergie devra augmenter rapidement dans les années à venir pour deux raisons à savoir : la première est l'évolution importante du secteur du bâtiment suite aux grands programmes annoncés dans la plateforme touristique marocaine sous l'étiquette "Plan Azur Maroc 2020" [SEC19], à savoir le programme d'urgence de l'éducation nationale, le programme de 150 000 logements par an, le programme de réhabilitation des hôpitaux, etc. Quant au deuxième, il s'agit de l'augmentation significative du taux d'équipement des ménages en CVC, en éclairage et en eau chaude grâce à l'amélioration de la qualité de vie et à la baisse des prix de ces équipements (chauffage, ventilation, climatisation, chauffe-eau, réfrigération, etc...).

Les travaux de ce présent chapitre ont député avec le projet SOLARTIGMI (financé principalement par OCP, IRESEN, HUU et EMSI), en collaboration avec l'Université Grenoble-Alpes, laboratoire TIMA. La thèse de B.Chegari rentre dans le cadre de ce projet (boursier de FRDISI, thèse en cotutelle avec l'UGA). Les travaux dans cet axe ont donné lieu à des publications [CHE201, CHE202, CHE191, CHE192]. Durant ces travaux, nous avons abordé l'impact de la consommation sur les charges consommatrices d'énergie d'un bâtiment typique au Maroc. L'accent est mis sur l'optimisation des performances énergétique basant sur la réglementation thermique des bâtiments (RTCM). Nous rappelons que le secteur du bâtiment au Maroc représente environ 25% de la consommation totale d'énergie du pays, dont 18% pour le secteur résidentiel et 7% pour le secteur tertiaire. L'intégration des énergies renouvelables dans le secteur du bâtiment fait l'objet d'une tendance majeure en termes de projets futurs au Maroc, notamment la grande compétition SDA qui a eu lieu à Benguerir, ainsi que le grand projet ZentaEcocity à Casablanca. La Maroc vise une stratégie qui lui permettra de réaliser 50% de sa consommation d'électricité à partir d'une source d'énergie locale renouvelable, nouvelle et propre.

L'application de l'efficacité énergétique et l'intégration des énergies renouvelables constituent l'un des axes prioritaires pour contribuer à la réduction de la facture énergétique au Maroc. Ainsi, l'intégration des énergies renouvelables au secteur du bâtiment apparaît très importante à étudier (l'objectif de la thèse de A.Chakir dans le chapitre précédent). En effet, le Maroc a une vision envers son bilan énergétique qui peut s'exprimer par l'étude plus approfondie d'un scénario basé sur une utilisation accrue de la gestion de l'énergie, dans lequel les énergies renouvelables atteindraient 50% de celui-ci [ALA]. Ce secteur des énergies renouvelables connaît actuellement un développement très important par rapport au secteur de l'efficacité énergétique au Maroc. Logiquement, l'efficacité énergétique doit être appliquée d'abord afin de minimiser la facture énergétique et ensuite l'intégration des énergies renouvelables.

Dans ce cadre, de nombreux chercheurs ont mené plusieurs études numériques et expérimentales sur l'efficacité énergétique appliquée au secteur du bâtiment à l'international. D'une manière générale, ces études visent à réduire la demande en chauffage et en climatisation. Les auteurs dans [SGH18] ont étudié l'impact d'un porte-à-faux optimisé sur les économies d'énergie et le confort thermique d'un bâtiment sous trois climats différents. Les résultats montrent que le confort thermique est amélioré, et que les porte-à-faux optimisés réduisent la demande en climatisation de 4,1% pour le climat méditerranéen de Casablanca, qui ne présente aucune contradiction entre l'amélioration du confort thermique et la performance énergétique. Les travaux dans [JIH18] ont s'orienté la prévision de la demande énergétique des bâtiments résidentiels dans la zone climatique d'Agadir, au Maroc tout en tirant parti des différents paramètres de la partie passive du bâtiment grâce à l'utilisation de réseaux de neurones artificiels comme algorithme d'apprentissage. Les résultats montrent qu'en comparant les valeurs calculées avec les sorties du réseau, il est montré que le réseau neural artificiel donne des résultats satisfaisants avec une précision de 98,7% et 97,6% respectivement pour la prévision et les données de test. Dans [ROM15], les auteurs ont développé et validé des métamodèles relatifs à la demande d'énergie en chauffage et en climatisation pour des maisons individuelles situées dans six climats marocains. Les résultats montrent que la démarche est utilisée avec succès pour réaliser une optimisation opérationnelle rapide de l'enveloppe du bâtiment afin d'améliorer la mise en œuvre de bâtiments à faible consommation d'énergie au Maroc. Dans [SGH19], ils ont étudié l'effet de l'utilisation de quatre techniques de refroidissement passif, à savoir la peinture froide, les débords, l'isolation réfléchissante et les stores mobiles automatisés, sur le confort thermique et la performance énergétique dans un bâtiment de type villa marocaine en briques d'argile-paille. Les résultats montrent que chaque technique passive étudiée, prise individuellement, était plus efficace en termes d'économie d'énergie totale à Marrakech, à l'exception de l'isolation réfléchissante qui a donné les mêmes résultats pour les deux sites (Marrakech et Oujda). Les auteurs dans [ZHA17] ont mis en évidence l'effet de la couche d'isolation sur le flux de chaleur de la surface de la paroi intérieure pendant la période de fonctionnement de la climatisation. Les résultats montrent que l'utilisation d'un mur d'isolation thermique interne correspond à la plus petite valeur de flux thermique, qui est inférieure à 35% à 86% par rapport aux autres endroits (isolation extérieure et intermédiaire). Dans [KHE12], ils ont étudié l'impact de différents paramètres thermo-physiques sur la température de la surface extérieure et du mur intermédiaire pour trois types de construction : légère, moyenne et lourde. Les résultats montrent : pour que ce phénomène d'accumulation / libération de la chaleur soit possible, il est nécessaire, d'une part, de favoriser l'utilisation de matériaux de construction lourds pour assurer l'accumulation et, d'autre part, d'assurer le contact entre eux et l'air frais de ventilation pour évacuer la chaleur accumulée. Les travaux dans [BEN19] ont montré que l'utilisation de l'isolation thermique peut être considérée comme une solution efficace et fiable. Cependant, une bonne compacité contribue positivement à l'efficacité de l'ensemble. L'amélioration de l'efficacité énergétique, en particulier lorsque le bâtiment est doté d'une isolation thermique renforcée. Enfin, une conception plus compacte permettra d'économiser en moyenne près de 7,29 % de la facture totale et de réduire les coûts de maintenance pour un temps de retour sur investissement un peu plus long. Dans [LAP18], les auteurs ont présenté, grâce à l'optimisation multicritères de la performance thermique du bâtiment par l'algorithme NSGA-II, des solutions optimales pour des stratégies passives basées sur les préférences des utilisateurs pour différentes conditions climatiques. Trois solutions optimales ont été proposées : la première est la plus faible consommation d'énergie pour le chauffage et l'éclairage artificiel, la deuxième est la température la plus confortable en été pour le bâtiment sans climatisation et la dernière est la solution de compromis prenant en compte le coût de construction sur les solutions de compromis des deux critères précédents. En outre, ils ont étudié la sensibilité des paramètres de conception et leur impact sur les éléments techniques passifs pour la performance thermique globale du bâtiment.

Dans cette optique, ces travaux viennent pour apporter une contribution positive, en étudiant l'impact de la partie passive d'un bâtiment typique marocain de R+1. En particulier, il s'agit de l'impact de l'isolation thermique, sur son autosuffisance énergétique sous différents climats. La simulation via TRNSYS a été utilisée pour concevoir et développer une plateforme permettant de quantifier cet objectif de manière globale et spécifique. Cette plateforme combine tout un système hybride, basé sur deux sources d'énergie renouvelables nouvelles et propres (éolienne et photovoltaïque), aux charges thermiques du bâtiment. Les résultats montrent que l'impact de l'isolation thermique sur l'autosuffisance énergétique du bâtiment dans tous les climats étudiés est très important, en particulier dans la ville d'Ifrane (Maroc). Les résultats de simulation de la plateforme ont montré que l'autosuffisance énergétique dans ce climat a été améliorée de 41.28% de plus par rapport à la situation de référence. Nous suggérons aussi dans les travaux de cette thèse de faire figurer, dans le code thermique du bâtiment marocain, l'impact de la partie passive du bâtiment sur son autosuffisance énergétique sous forme d'indicateurs quantitatifs, afin d'encourager les gens à s'impliquer dans ce développement.

II. Méthodologie

Les démarches de simulation liées aux résultats mentionnés dans ce travail, ont été réalisées via le logiciel TRNSYS [KLE10] couplé à la plateforme TRNBuild [KLE07]. Il s'agit d'un package de simulation complet, proposé par le CSTB [21] et reconnu par l'ASHRAE [CST19]. Il contient plusieurs outils, des programmes de moteur de simulation, une connexion graphique aux traceurs et aux tableurs. C'est un outil intégré qui peut être utilisé de la conception du projet à sa simulation. Ce package sera utile pour concevoir et développer une plateforme permettant de calculer l'impact de n'importe quel paramètre de la partie passive du bâtiment sur son autosuffisance énergétique sous différents climats (figure 82).

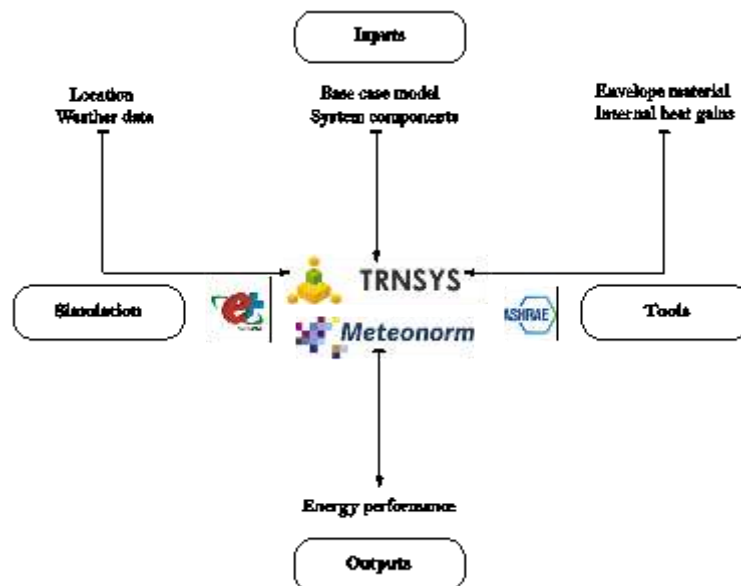


Figure 74 Diagramme d'évaluation de la performance énergétique

Il faut noter que les résultats de ces travaux qui seront référencés en comparaison avec le RTCM. Cette dernière a finalement été introduite par la publication du décret n° 2-13-874 du 15 octobre 2014 au bulletin officiel n° 6306 du 06 novembre 2014 [AME19]. Ce décret approuve le règlement général de la construction fixant les règles de performance énergétique des bâtiments et instituant le Comité national pour l'efficacité énergétique des bâtiments. Le RTCM développé par l'AMEE vise essentiellement à améliorer la performance thermique des bâtiments neufs [AME14]. Il est à noter que

tous les calculs effectués par le logiciel TRNSYS ont été réalisés dans des conditions normalisées. La figure 1 montre le diagramme adopté pour l'évaluation de la performance énergétique du système étudié.

Le système consiste à coupler les charges thermiques du bâtiment, en particulier les demandes en chauffage et en climatisation, à une alimentation électrique hybride composée d'une éolienne et d'un champ photovoltaïque avec un parc de batteries de stockage d'énergie électrique relié à un régulateur. L'adaptation de la tension est réalisée via des convertisseurs statiques tels que le redresseur AC/DC, le convertisseur DC/DC et l'onduleur DC/AC (figure 83).

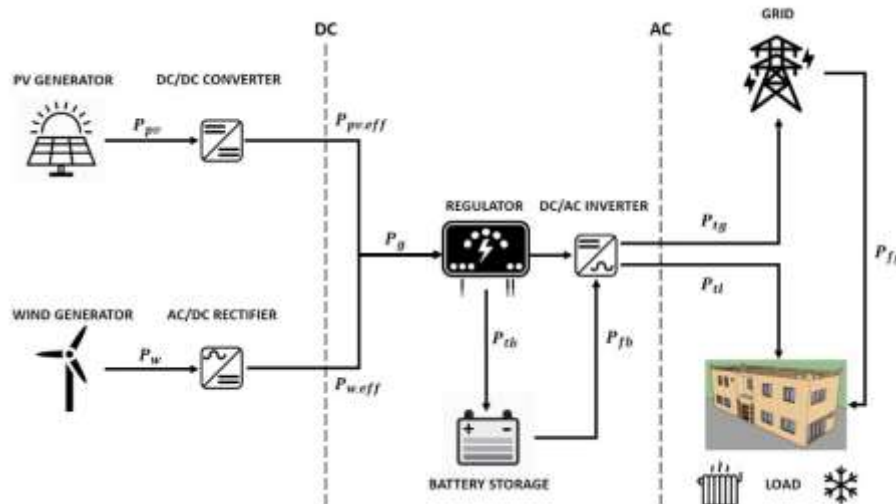


Figure 75 Architecture proposée

III. Différents paramètres de construction

1. Taux global des baies vitrées

Le taux global des baies vitrées, des espaces chauffés et/ou refroidis d'un bâtiment, est défini par le rapport entre la surface totale de leurs baies vitrées S_{bv} et la surface brute totale de leurs murs extérieurs S_m comme indiqué dans l'Eq. (78) [AME14].

$$WWR(\%) = \frac{\sum S_{bv}}{\sum S_m} \times 100 \quad (78)$$

2. Inertie thermique

L'inertie thermique peut être définie simplement comme la capacité d'un matériau à stocker la chaleur et à la libérer progressivement. Cette caractéristique est très importante pour assurer un bon confort, surtout en été, afin d'éviter les surchauffes. En vue d'assurer le confort en été (éviter la surchauffe), un matériau présentant les caractéristiques suivantes est nécessaire [INT06][ENR06]:

- Une faible diffusivité α_t , afin de rendre l'échange d'énergie thermique entre le climat extérieur et le climat intérieur aussi lent que possible (inertie dans la transmission).
- Une effusivité thermique élevée E_t , pour que le mur stocke un maximum de fraîcheur dans les éléments en contact avec l'intérieur du bâtiment (inertie par absorption).

La figure 84 montre un exemple de l'évolution des températures intérieures pendant une journée d'été dans un bâtiment à forte inertie et dans un bâtiment à faible inertie. Les équations représentant la diffusivité et l'effusivité thermique sont les suivantes [MUN14]:

$$\alpha_t = \frac{\lambda}{\rho \times c} \quad (79)$$

$$E_t = \sqrt{\lambda \times \rho \times c} \quad (80)$$

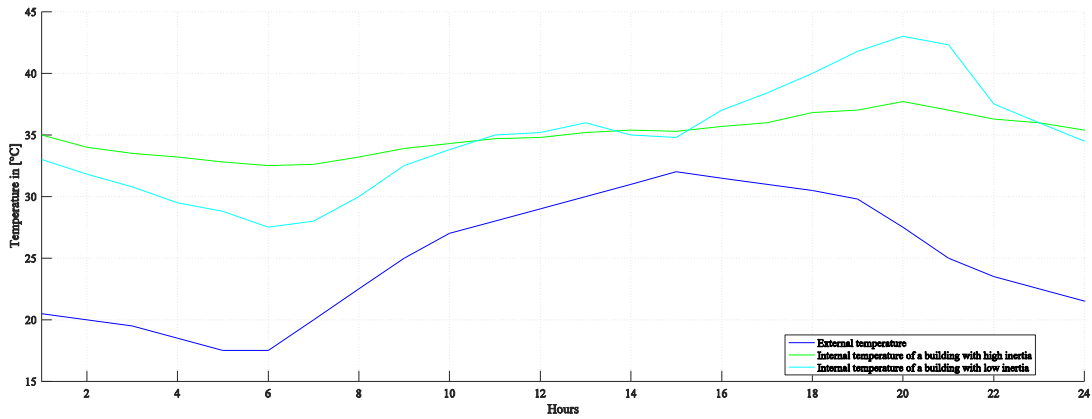


Figure 76 Évolution des températures intérieures d'un bâtiment par rapport aux températures extérieures

3. Déphasage thermique

Le déphasage thermique d'un matériau représente le temps de transfert du flux de chaleur à travers le matériau. Cette grandeur caractérise donc la capacité d'un matériau à retarder les variations de température. Le déphasage thermique étant directement lié au taux de transfert via l'épaisseur du matériau, l'équation suivante est obtenue pour le déphasage [ENE06]:

$$T_{ps} = \frac{e \times T_{tv}}{2\pi} \times \sqrt{\frac{\pi \times \rho \times c}{\lambda \times T_{tv}}} \quad (81)$$

Si la période du cycle de variation de la température correspond à 24 heures, on obtient :

$$T_{ps} = \frac{1.38 \times e}{\sqrt{\alpha_t}} \quad (82)$$

4. Degré-jour unifié

Le degré-jour unifié est la différence entre la température extérieure et une température de référence qui permet d'estimer la consommation d'énergie thermique afin de maintenir un bâtiment confortable en fonction de la sévérité de l'hiver ou de la chaleur de l'été [IDC15, KUR16, DAM19, QUA80, BAN18].

- Degré-jour de climatisation

$$CDD = \sum_{i=0}^{i=m} \frac{T_{ext,m} - \theta_{s,b}}{24} \Delta t \quad m \in M_h = [0,1, \dots m] ; M_h \in \mathbb{N} \quad (83)$$

$$\{T_{ext,m} > \theta_{s,b}\} \quad (84)$$

- Degré-jour de chauffage

$$HDD = \sum_{i=0}^{i=m} \frac{\theta_{w,b} - T_{ext,m}}{24} \Delta t \quad m \in M_h = [0,1, \dots m] ; M_h \in \mathbb{N} \quad (85)$$

$$\{T_{ext,m} < \theta_{w,b}\} \quad (86)$$

Il est à noter que la période de collecte des données de température prises en considération dans le calcul s'étend en moyenne sur 10 ans. Le HDD et le CDD seront déterminés à une température de base de 18°C et 21°C respectivement, comme le recommande le code thermique des bâtiments marocains.

5. Bilan énergétique

Le bilan énergétique est une comptabilité des entrées et des sorties d'énergie du bâtiment sur une période donnée. Ce bilan doit évidemment être équilibré, par des économies d'énergie. Le bilan énergétique détaille donc l'ensemble des pertes et des gains [INT17].

▪ *Bilan thermique*

Besoins en climatisation

$$Q_{tot,c} = Q_{T,c} + Q_{V,c} + Q_{S,c} + Q_{I,c} \quad (87)$$

Besoin en chauffage

$$Q_{tot,h} = Q_{T,h} + Q_{V,h} - (Q_{S,h} + Q_{I,h}) \quad (88)$$

Il est à noter que, dans ce papier, nous ne prenons en considération que la partie sensible du bilan thermique.

▪ *Bilan électrique*

La consommation d'énergie électrique est calculée en additionnant les différentes puissances absorbées P_i relatives aux équipements et en les multipliant par leur temps de fonctionnement t_i .

$$E_d = \sum_{i=0}^{i=l} P_i t_i \quad l \in N_{num} = [0,1, \dots l] ; N_{num} \in \mathbb{N} \quad (89)$$

IV. Production et distribution d'énergie électrique

1. Générateur photovoltaïque

Dans cette partie, nous développons les caractéristiques du générateur photovoltaïque utilisé dans les travaux de ce chapitre. Le rayonnement solaire horaire G incident sur le plan incliné du générateur PV est la somme du rayonnement direct, diffus et réfléchi [ROB10]:

$$G = G_{b,h}R_b + G_{d,h}R_d + (G_{b,h} + G_{d,h})R_r \quad (90)$$

La performance du générateur PV est déterminée en résolvant le circuit électrique équivalent composé d'un générateur de courant continu, d'un courant idéal, d'une diode et d'une résistance (comme le montre la figure 85) [SOL09] :

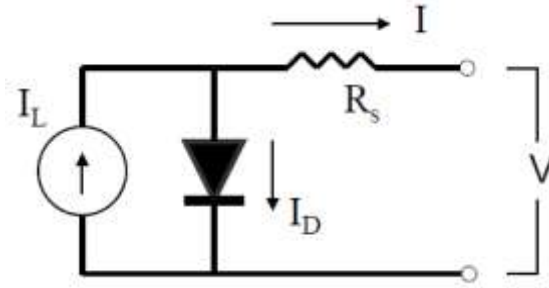


Figure 77 Circuit électrique équivalent dans le modèle PV considéré

La caractéristique courant-tension du circuit est représentée par l'Eq. (91):

$$I = I_L - I_0 \left[e^{\frac{V + IR_s}{\tau}} - 1 \right] \quad (91)$$

Bien que:

$$\tau = \frac{N_s u_i k T_c}{q} \quad (92)$$

La puissance électrique produite par le générateur PV est calculée au point de puissance maximale de la courbe caractéristique par l'Eq. (93):

$$P_{pv}(t) = I_{mp}(t) V_{mp}(t) \quad (93)$$

En cas de besoin spécifique :

$$P_{pv,c} = \frac{E_d}{I_j \eta_{pv}} \quad (94)$$

2. Générateur éolien

La puissance électrique éolienne en fonction de la vitesse du vent est évaluée par la courbe de puissance de référence expérimentale. Cette courbe est déterminée à une valeur spécifique de la densité de l'air en utilisant les valeurs de la vitesse du vent mesurées à la hauteur du moyeu de l'éolienne. Dans les conditions de fonctionnement, la puissance produite est déterminée au moyen d'un algorithme de calcul qui utilise à tout moment les étapes suivantes [MAZ18] :

- Calcul de la densité de l'air à la hauteur réelle de fonctionnement Z_h de l'éolienne, en fonction de la température et de la pression de l'air ;
- Calcul de la vitesse du vent $V_h(t)$ à la hauteur de fonctionnement réelle Z_h de l'éolienne, en partant de la vitesse du vent $V_{an}(t)$ à la hauteur anémométrique Z_{an} par l'Eq (95), connue sous le nom d'exposant de cisaillement γ ;
- Évaluation de la puissance de la turbine $P_0(t)$ à la hauteur de fonctionnement réelle grâce à l'utilisation de la courbe de puissance expérimentale tracée pour une densité de l'air de référence ρ_0 ;
- Détermination de la puissance correcte $P_\rho(t)$ et de la vitesse nominale correcte $V_{nom,\rho}$, respectivement au moyen des équations (117) et (118), afin de considérer la valeur actualisée de la densité de l'air, en relation avec la méthode du mode de contrôle de la puissance;
- Calcul de la puissance nette $P_{\rho,net}$ en tenant compte des pertes diverses ℓ

$$\frac{V_h(t)}{V_{an}(t)} = \left(\frac{Z_h}{Z_{an}} \right)^{\gamma(t)} \quad (95)$$

$$\frac{P_\rho(t)}{P_0(t)} = \frac{\rho(t)}{\rho_0} \quad (96)$$

$$\frac{V_{nom,\rho}(t)}{V_{nom,\rho_0}} = \left(\frac{\rho_0}{\rho(t)} \right)^{\frac{1}{3}} \quad (97)$$

$$P_w(t) = P_{\rho,net}(t) = P_\rho(t) \left(1 - \frac{\ell}{100} \right) \quad (98)$$

Les éoliennes, en général, transforment l'énergie cinétique de l'air en travail utile. P_w décrit la puissance de sortie de l'éolienne, où [SAL18, LI16]:

$$P_w = \frac{1}{2} C_p \rho A_r U_0^3 \quad (99)$$

3. Batterie

La performance des batteries est évaluée à l'aide d'un modèle qui utilise l'équation d'équilibre instantané de l'état de charge (SOC). Dans la phase de charge, le taux de charge est obtenu à partir de cette équation :

$$\frac{dSOC}{dt} = P(t) \eta_{bat} = P_{tb}(t) \quad (100)$$

Dans la phase de décharge, le taux de décharge est obtenu à partir :

$$\frac{dSOC}{dt} = P(t) = -P_{fb}(t) \quad (101)$$

Le SOC à l'instant t est déterminé par la discrétisation de l'Eq. (100) et l'Eq. (101):

$$\begin{cases} SOC(t+1) = SOC(t) + P_{tb}(t)\eta_{bat}\Delta t & P(t) > 0 \\ SOC(t+1) = SOC(t) - P_{fb}(t)\Delta t & P(t) < 0 \end{cases} \quad (102)$$

Pour un dimensionnement spécifique de la capacité de stockage de la batterie C_{bat} , le calcul est effectué par l'Eq. (103) :

$$C_{bat} = \frac{E_f N_{da}}{DU_{bat}} \quad (103)$$

À tout moment, le SOC est soumis aux contraintes :

$$\begin{cases} SOC_{min}(t+1) < SOC(t) \\ SOC_{max}(t+1) > SOC(t) \end{cases} \quad (104)$$

Une fois le SOC connu, la fraction de charge $f_{soc}(t+1)$ est calculée en fonction de la capacité de la batterie C_{bat} par l'Eq. (105):

$$f_{soc}(t+1) = \frac{SOC(t+1)}{C_{bat}} \quad (105)$$

4. Régulateur

Le régulateur, caractérisé par un rendement η_{reg} , compare à chaque instant la puissance générée $P_g(t)$, soit la somme de la puissance produite par le système PV $P_{pv,eff}(t)$ et le système éolien $P_{w,eff}(t)$, avec la charge instantanée $P_{l,el}(t)$. Le résultat de la comparaison entre $P_g(t)$ et $P_{l,el}(t)$ à un moment donné détermine le mode de fonctionnement du système et la puissance fournie par le système hybride à la charge $P_{l,el}(t)$.

$$P_g(t) = P_{pv,eff}(t) + P_{w,eff}(t) \quad (106)$$

$$P_{l,el}(t) = 0.6 \times \frac{P_{cool,th}(t)}{EER} + 0.6 \times \frac{P_{heat,th}(t)}{COP} \quad (107)$$

5. Convertisseurs statiques

La puissance électrique de sortie de chacun des convertisseurs statiques est calculée, à partir des valeurs d'entrée, par le biais d'un rendement de conversion électrique :

Convertisseur DC/DC :

$$P_{pv,eff}(t) = P_{pv}(t)\eta_{conv} \quad (108)$$

Redresseur AC/DC:

$$P_{w,eff}(t) = P_w(t)\eta_{rec} \quad (109)$$

Onduleur AC/DC:

$$P_{inv,out}(t) = P_{inv,in}(t)\eta_{inv} \quad (110)$$

Dans l'Eq. (108), l'Eq. (109) et l'Eq. (110), η_{conv} , η_{rec} et η_{inv} sont l'efficacité des convertisseurs statiques correspondants.

6. Simulation thermique dynamique et bilan instantané

▪ Puissance instantanée

Premier cas:

$$P_g(t) = [P_{pv,eff}(t) + P_{w,eff}(t)] = \frac{P_{tl}(t)}{\eta_{reg}\eta_{inv}} + \frac{P_{tb}(t)}{\eta_{reg}} + \frac{P_{tg}(t)}{\eta_{reg}\eta_{inv}} \quad (111)$$

Contraintes : l'énergie excédentaire est utilisée pour charger la batterie $P_{tb}(t)$ et, dans des conditions de charge totale, est envoyée au réseau électrique $P_{tg}(t)$.

$$\begin{cases} \eta_{reg}\eta_{inv}P_g(t) > P_{tl}(t) \\ P_{fb} = 0 \\ P_{fg} = 0 \end{cases} \quad (112)$$

Deuxième cas :

$$P_{tl}(t) = P_g(t)\eta_{reg}\eta_{inv} + P_{fb}(t)\eta_{inv} = [P_{pv,eff}(t) + P_{w,eff}(t)]\eta_{reg}\eta_{inv} + P_{fb}(t)\eta_{inv} \quad (113)$$

Contraintes : l'énergie manquante est tirée de la batterie $P_{fb}(t)$ et, si nécessaire, du réseau électrique $P_{fg}(t)$.

$$\begin{cases} \eta_{reg}\eta_{inv}P_g(t) < P_{tl}(t) \\ P_{tb} = 0 \\ P_{tg} = 0 \end{cases} \quad (114)$$

Troisième cas :

$$P_g(t) = [P_{pv,eff}(t) + P_{w,eff}(t)] = \frac{P_{tl}(t)}{\eta_{reg}\eta_{inv}} \quad (115)$$

Contraintes :

$$\begin{cases} \eta_{reg}\eta_{inv}P_g(t) = P_{l,el}(t) \\ P_{tb} = 0 \\ P_{fb} = 0 \\ P_{tg} = 0 \\ P_{fg} = 0 \end{cases} \quad (116)$$

Sur la base de la charge instantanée :

- Dans le premier et le troisième cas, la puissance requise par la charge est entièrement fournie par le système hybride :

$$P_{l,el}(t) = P_{tl}(t) \quad (117)$$

- Dans le deuxième cas, la puissance requise par la charge est fournie en partie par le système hybride et en partie tirée du réseau électrique :

$$P_{l,el}(t) = P_{tl}(t) + P_{fg}(t) \quad (118)$$

▪ Énergie totale requise

L'énergie totale requise par la charge $E_{l,el}$ est alimentée en partie par le système hybride E_{dl} et en partie par le réseau électrique E_{fg} :

$$E_{l,el} = E_{tl} + E_{fg} \quad (119)$$

Où, l'énergie envoyée directement à la charge E_{dtl} comme suit :

$$E_{tl} = E_{dtl} + E_{fb}\eta_{inv} \quad (120)$$

L'énergie totale générée E_g par les générateurs photovoltaïques et éoliens est exprimée par l'Eq. (121):

$$E_g = E_{pv}\eta_{conv} + E_w\eta_{rec} \quad (121)$$

E_g est en partie envoyée directement à la charge E_{dtl} , en partie stockée dans la batterie E_{tb} et en partie envoyée au réseau électrique E_{tg} :

$$E_g = \frac{E_{dtl}}{\eta_{reg}\eta_{inv}} + \frac{E_{tb}}{\eta_{reg}} + \frac{E_{tg}}{\eta_{reg}\eta_{inv}} \quad (122)$$

▪ Taux d'autosuffisance énergétique

$E_{ssr}(\%)$ représente le taux d'autosuffisance énergétique, qui est calculé en utilisant l'Eq. (123) et l'Eq. (124):

$$E_{ssr}(\%) = \sum_{defined\ period} \frac{E_{l,el}}{E_{tl}} \times 100 \quad (123)$$

Contraintes:

$$\{E_{l,el} \leq E_{tl} \quad (124)$$

▪ **Taux d'amélioration**

$$I_r(\%) = \frac{E_{ssr,opt}(\%) - E_{ssr,b}(\%)}{E_{ssr,b}(\%)} \quad (125)$$

V. Environnement de simulations

1. Description du bâtiment de référence

Le bâtiment étudié est une maison R+1 typique du Maroc, avec trois façades. Les figures 86 et 87 montrent une vue de la maison et leurs dimensions conçues et modélisées avec AutoCA et SketchUP. Chaque niveau a une surface de 140m² et une hauteur de 3m. Le rez-de-chaussée comprend deux salons, un séjour, une cuisine et un WC. Quant au premier étage, il comprend deux chambres, deux dressings, deux WC, une suite parentale et un séjour. Il est à noter que chaque niveau est occupé par quatre personnes (deux adultes et deux enfants).



Figure 78 Orientations du bâtiment de référence



Figure 79 Vue axonométrique du bâtiment de référence

2. Zonage thermique

Le bâtiment étudié est divisé en 13 zones thermiques. Les deux WC du premier étage sont considérés comme une seule et même zone (11) en raison de la similarité de leurs géométries et des gains de chaleur internes. Quant à la cage d'escalier, elle est modélisée comme faisant partie de l'habitation puisqu'il n'y a pas de séparation thermique. Les figures 88 et 89 montrent le zonage thermique de cette maison.

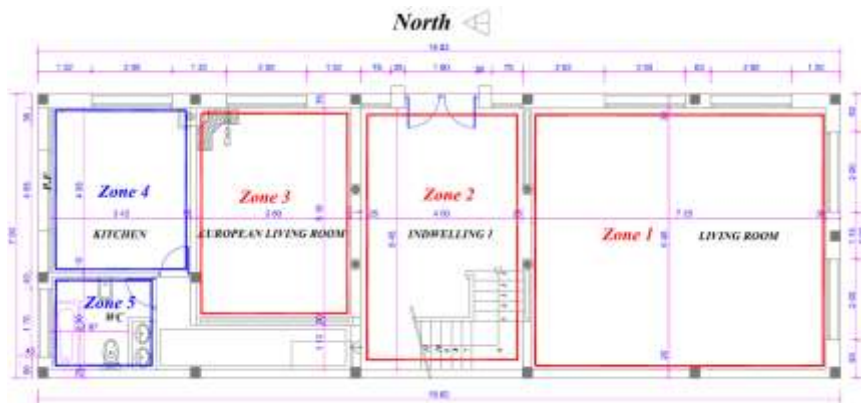


Figure 80 Zonage thermique au niveau du plan 2D du rez-de-chaussée



Figure 81 Zonage thermique au niveau du plan 2D du premier étage

3. Composition de l'enveloppe du bâtiment

Le tableau 28 résume la composition des murs, du toit, du sol et des vitres du bâtiment étudié. Les propriétés thermo-physiques recueillies sont issues de la bibliothèque perspective BINAYAT de

l'AMEE [BIO14], puisque la plupart de ces échantillons de ces matériaux existant au Maroc sont proches des valeurs par défaut fournies par le logiciel TRNSYS.

Élément de construction	Matériau	Épaisseur en cm	Conductivité thermique en $W.m^{-1}.K^{-1}$	Capacité thermique en $kJ.kg^{-1}.K^{-1}$	Densité volumique en $kg.m^{-3}$	Diffusivité en $m^2.s^{-1}$	Effusivité en $J.K^{-1}.m^{-2}.s^{-1/2}$	Déphasage thermique en Heurs
Mur extérieur	Mortier de ciment	1.50	1.80	1.00	2500	$7.20.10^{-7}$	2121.32	0.41
	Terre cuite	10.00	1.04	1.00	2350	$4.43.10^{-7}$	1563.33	3.46
	Lame air	5.00	$R=0.18 m^2.K.W^{-1}$					
	Terre cuite	10.00	1.04	1.00	2350	$4.43.10^{-7}$	1563.33	3.46
	Mortier de ciment	1.50	1.80	1.00	2500	$7.20.10^{-7}$	2121.32	0.41
Toiture	Enduit plâtre	2.00	0.56	1.00	1350	$4.15.10^{-7}$	869.48	0.71
	Hourdis	20.00	1.32	1.00	1327	$9.91.10^{-7}$	1321.64	4.62
	Béton	5.00	2.00	1.00	2450	$8.16.10^{-7}$	2213.59	1.27
	Mortier de ciment	1.50	1.80	1.00	2500	$7.20.10^{-7}$	2121.32	0.41
	Carrelage	1.50	1.30	0.84	2300	$6.73.10^{-7}$	1584.80	0.42
Plancher bas	Mortier de ciment	1.50	1.80	1.00	2500	$7.20.10^{-7}$	2121.32	0.41
	Hourdis	16.00	1.18	1.00	1372	$8.57.10^{-7}$	1270.32	3.98
	Concrete	4.00	2.00	1.00	2450	$8.16.10^{-7}$	2213.59	1.02
	Mortier de ciment	1.50	1.80	1.00	2500	$7.20.10^{-7}$	2121.32	0.41
Plancher intermédiaire	Enduit plâtre	1.50	0.56	1.00	1350	$4.15.10^{-7}$	869.48	0.54
	Hourdis	16.00	1.18	1.00	1372	$8.57.10^{-7}$	1270.32	3.98
	Béton	4.00	2.00	1.00	2450	$8.16.10^{-7}$	2213.59	1.02
	Mortier de ciment	1.50	1.80	1.00	2500	$7.20.10^{-7}$	2121.32	0.41
Mur intérieur	Mortier de ciment	1.50	1.80	1.00	2500	$7.20.10^{-7}$	2121.32	0.41
	Agglo en béton 6 trous	12.00	0.56	0.83	768	$8.77.10^{-7}$	596.93	2.95
	Mortier de ciment	1.50	1.80	1.00	2500	$7.20.10^{-7}$	2121.32	0.41
Vitrage	Simple vitrage	$U = 5.16 W.m^{-2}.K^{-1}$ et $g = 0.68$						

Tableau 28 Composition des murs et propriétés thermo-physiques

4. Taux global des baies vitrées

Le tableau 29 résume le calcul détaillé du WWR, qui est de 24% pour le bâtiment étudié.

Façade	Orientation	Surface des murs extérieurs en m^2	Surface des fenêtres en m^2	Rapport fenêtre/mur en %
Principale	E	120	27.60	23%
Gauche	S	49	9.90	20%
Droite	N	49	14.20	29%
Total		218	51.70	24%

Tableau 29 Résumé du calcul du taux globales des baies vitrées

Niveau	Zone	Désignation	Conditionnement	Type de gain	Nombre	Horaire journalier	Gains internes
RDC	1	Salon	Contrôlée	Eclairage		19-22h	$5W.m^{-2}$
				TV	1	12-14h et 18-20h	100W
				Conditionnement d'air	1	19-22h	120W
				Occupation	4	07-8h, 12-14h et 18-20h (Assis au repos)	$60W.pers^{-1}$
	2	Séjour	Contrôlée	Eclairage		19-22h	$5W.m^{-2}$
				Conditionnement d'air	1	19-22h	120W
				Occupation	4	07-8h, 12-14h et 18-20h (Assis au repos)	$60W.pers^{-1}$
	3	Salon EUR.	Contrôlée	Eclairage		19-22h	$5W.m^{-2}$
				TV	1	12-14h et 18-20h	100W

1 ^{er} étage				Conditionnement d'air	1	19-22h	120W
				Occupation	4	07-8h. 12-14h et 18-20h (Assis au repos)	60W.pers ⁻¹
	4	Cuisine	Non contrôlée	Eclairage		18-22h	5W.m ⁻²
				Réfrigérateur	1	24h	300W
				Four encastrable	1	18-19h (Une fois par semaine)	2500W
				Machine à lavé	1	18-19h (2 fois par semaine)	1500W
	5	WC	Non contrôlée	Eclairage		18-22h	5W.m ⁻²
	6	Suite parentale	Contrôlée	Eclairage		20-22h	5W.m ⁻²
				PC portable	2	20-22h	50W.PC ⁻¹
				Conditionnement d'air	1	20-22h	120W
				Occupation	2	20-22h (Repos)	60W.pers ⁻¹
	7	WC	Non contrôlée	Eclairage		18-22h	5W.m ⁻²
	8	Dressing	Non contrôlée	Eclairage		19-22h	5W.m ⁻²
				Eclairage		19-22h	5W.m ⁻²
	9	Séjour 2	Contrôlée	Conditionnement d'air	1	19-22h	120W
				Occupation	4	07-8h. 12-14h et 18-20h (Assis au repos)	60W.pers ⁻¹
	10	Chambre 1	Contrôlée	Eclairage		20-22h	5W.m ⁻²
				PC portable	1	20-22h	50W.PC ⁻¹
				Conditionnement d'air	1	20-22h	120W
				Occupation	1	20-22h (Repos)	60W.pers ⁻¹
	11	WC	Non contrôlée	Eclairage		18-22h	5W.m ⁻²
	13	Chambre 2	Contrôlée	Eclairage		19-22h	5W.m ⁻²
				Eclairage		20-22h	5W.m ⁻²
				PC portable	1	20-22h	50W.PC ⁻¹
				Conditionnement d'air	1	20-22h	120W
				Occupation	1	20-22h (Repos)	60W.pers ⁻¹

Tableau 30 Gains de chaleur interne

5. Gains de chaleur interne

Le tableau 30 montre les charges internes du bâtiment [LES19], qui représentent une source de gain de chaleur en hiver et une charge en été. En outre, la consommation énergétique quotidienne peut être estimée par le biais à 24 kWh.jour⁻¹.

6. Conditions de conditionnement d'air

Les hypothèses de calcul pour le conditionnement d'air prises en considération lors de la simulation sont les suivantes :

- Ventilation naturelle dans toutes les zones : 1 v.h⁻¹
- Ventilation naturelle dans la cuisine : 5 v.h⁻¹
- Infiltration: 0,1 v.h⁻¹
- $\theta_s = 26 \text{ }^{\circ}\text{C}$
- $\theta_w = 20 \text{ }^{\circ}\text{C}$

7. Localisation et données météorologiques

Les fichiers TMY2 générés à l'aide du logiciel Meteonorm [MET19] ont été utilisés dans cette étude de cas pour décrire les caractéristiques climatiques des villes étudiées, dont certaines sont résumées dans le tableau 31.

Location	Agadir (Maroc)	Tanger (Maroc)	Fès (Maroc)	Ifrane (Maroc)	Marrakech (Maroc)	Errachidia (Maroc)
Latitude	30.4°N	35.7°N	33.9°N	33.5°N	31.6°N	31.9°N
Longitude	-9.6°E	-5.8°E	-5.0°E	-5.2°E	-8.0°E	-4.4°E
Élévation [m]	23	85	579	1665	466	1045
Température mensuelle moyenne la plus élevée [°C]	23.8(Juillet)	24.7(Août)	26.6(Août)	26.1(Juillet)	28.8(Juillet)	33.6(Juillet)
Température mensuelle moyenne la plus basse [°C]	13.7(Janvier)	12.2(Janvier)	9.3(Janvier)	6(Janvier)	11.9(Janvier)	8.5(Janvier)
Degré-jour de chauffage	619.13	830.28	1295.28	1901.16	754.24	1034.26
Degré-jour de climatisation	549.27	441.37	712.51	516.76	1041.74	1406.72
Rayonnement solaire global horizontal moyen annuel en kWh.m ⁻² .jour ⁻¹	2.015	2.001	1.950	1.968	2.087	2.224
Classification climatique « Köppen »	Bsh (Climat chaud et semi-aride)	Csa (Climat méditerranéen)	Csa (Climat méditerranéen)	Csa (Climat méditerranéen)	Bsh (Climat chaud et semi-aride)	Bwh (Climat chaud et désertique)

Tableau 31 Localisation et données météorologiques

8. Isolation thermique

L'isolation thermique est un matériau conçu pour limiter le transfert de chaleur. Il forme une barrière contre les fluctuations de température et apporte ainsi un confort aux occupants d'une maison passive. On peut distinguer trois grandes catégories d'isolants sur le marché :

- ❖ Isolants naturels (Chanvre, fibres de bois, etc.);
- ❖ Isolants synthétiques (polystyrène, polyuréthane, etc.);
- ❖ Isolants minéraux (laine de verre, laine de roche, etc.).

Le tableau 32 résume certains des matériaux d'isolation à haute performance disponibles au Maroc selon la bibliothèque de perspectives de BINAYAT. L'objectif du choix de cette bibliothèque réside dans l'amélioration de la performance énergétique du bâtiment avec des matériaux d'isolation locaux, au lieu d'utiliser d'autres matériaux qui n'existent peut-être pas sur le territoire étudié.

Catégorie	Isolation thermique	Densité volumique en kg.m ⁻³	Conductivité thermique en W.m ⁻¹ .K ⁻¹	Capacité thermique en kJ.kg ⁻¹ .K ⁻¹
Laines minérales	Laine de roche	30.00	0.044	1.03
	Laine de verre	135.00	0.040	1.03
Polystyrène expansé	Plaques découpées dans des blocs moulés	50.00	0.038	1.45
Polystyrène extrudé	Plaques expansées aux chlorofluorocarbures	32.50	0.032	1.45
Polyuréthane	Polyuréthane projeté	45.00	0.025	1.00
Liège expansé	Plaque en liège expansé	131.00	0.041	1.60
Laine de chanvre	Rouleau en laine de chanvre	80.00	0.045	1.70

Tableau 32 Catégories d'isolation et propriétés thermo-physiques

9. Plateforme

La plateforme développée nommée (PBRES) est créée par le biais d'un groupe de composants énergétiques interconnectés, existant dans la bibliothèque des composants intrinsèques de TRNSYS, qui collectent, transforment et produisent de l'énergie électrique pour répondre principalement à la demande en chauffage et en climatisation du bâtiment. Cette dernière permet de visualiser les résultats de la simulation en temps réel. La figure 92 illustre l'architecture du PBRES dans l'environnement de TRNSYS.

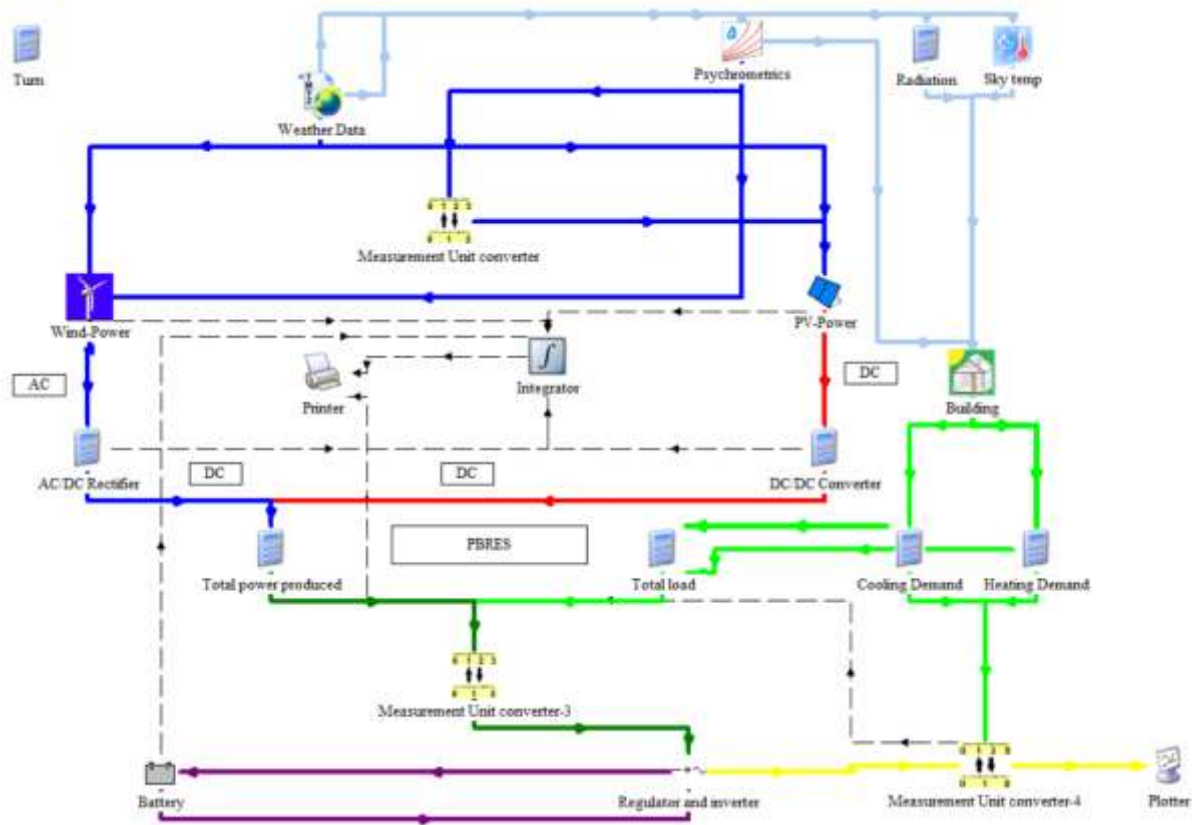


Figure 82 L'architecture du PBRES dans l'environnement de TRNSYS

10. Composantes du système

La consommation d'énergie journalière, telle que mentionnée dans la section 4.5, est estimée à 24 000 Wh.jour⁻¹. Ensuite, le calcul basé sur l'Eq. (121) et l'Eq. (122) nous a permis de dire que nous aurons besoin, d'une part, d'une puissance crête de 3000Wp générée par un champ photovoltaïque composé de 12 éléments de 250Wp chacun, connectés en série. D'autre part, une puissance de 3200W générée par une éolienne adaptée au secteur résidentiel [EOL19]. Ensuite, un parc d'accumulateurs d'énergie électrique [BAT19] composé de 4 batteries de 3000Wh chacune, connectées en série, d'un régulateur de charge avec une efficacité de 98% [REG19], d'un convertisseur DC/DC avec une efficacité de 92% [AME15], d'un redresseur AC/DC avec une efficacité de 86% [CHI19] et d'un onduleur DC/AC avec une efficacité de 98% [GRO19]. Le tableau 33 présente les caractéristiques électriques de chaque composant de l'installation

Module photovoltaïque		Générateur éolien		Batterie de stockage	
TS250-P156-60		KINGSPAN WIND KW3		GEL 12V 250Ah	
Puissance au point de puissance maximale P_{mp} (W)	250	Puissance nominale de la turbine P_w (kW)	3.2	Capacité énergétique C_b (kWh)	3
Tension de circuit ouvert V_{oc} (V)	37.4	Vitesse nominale du vent V_{nom-p0} (m.s ⁻¹)	12	Efficacité η_{bat} (-)	0.98
Courant de court-circuit I_{sc} (A)	8.65	Nombre de pales (-)	3	Régulateur	
Tension au point de puissance maximale V_{mp} (V)	30.3	Cut en (m.s ⁻¹)	3.5	MPPT VICTRON SMARTSOLAR 100/20	
Courant au point de puissance maximale I_{mp} (A)	8.26	Tensions disponibles	24V DC / 48V DC / 300V AC	Efficacité η_{reg} (-)	0.98
Efficacité de la conversion des modules η_{pv} (%)	15.27	Hauteur du moyeu Z_h (m)	11	Limite supérieure de la f_{soc} (-)	0.97
Surface de la cellule A_c (cm ²)	243.36	Perte de puissance des turbines ℓ (%)	6	Limite inférieure de la f_{soc} (-)	0.1
Surface du module A_m (m ²)	1.64	Diamètre du rotor D (m)	3.9	Onduleur DC/AC	
Nombre de cellules câblées en série n_c (-)	60	Densité de l'air ρ_0 (kg.m ⁻³)	1.225	GROWATT 18000UE	
Coefficient de température de I_{sc} (-)	0.0457	Hauteur de la collecte des données Z_{an} (m)	10	Efficacité η_{inv} (-)	0.98
Coefficient de température de V_{oc} (-)	- 0.3538	Exposant de cisaillement du site α (-)	0.14		
Angle d'inclinaison β (Degree)	31-36	Pression barométrique P (kPa)	101.3		
Nombre de modules en série (-)	12	Altitude du site alt (m)	220		
Nombre de modules en parallèle (-)	1	Redresseur AC/DC			
Convertisseur DC/DC		TMO-KDPS-10KW			
350DNC40-24-xG		Efficacité η_{rec} (-)	0.86		
Efficacité η_{conv} (-)	0.92				

Tableau 33 Caractéristiques électriques des composants de la PBRES

VI. Discussion et résultats

Dans cette section, nous allons d'abord montrer numériquement, à l'aide du logiciel TRNSYS, l'impact de l'introduction des différents isolants thermiques sur la performance énergétique du bâtiment de référence. Ensuite, nous évaluerons l'impact de l'isolation thermique la plus efficace sur l'autosuffisance énergétique grâce à la plateforme PBRES dans les différentes zones étudiées.

1. Performance énergétique du bâtiment de référence

Dans cette étude, le bâtiment de référence se réfère au fait que le bâtiment étudié repose sur des hypothèses quant aux mêmes caractéristiques qu'un bâtiment construit avant 2014, lorsque le RTCM n'était pas encore imposé. Il ne s'agit pas d'un bâtiment surveillé, c'est-à-dire avec une sorte de gestion de l'énergie et des données. Malheureusement, il n'y a pas de traçabilité avec laquelle nous pouvons identifier les indicateurs de performance énergétique auxquels nous pouvons comparer nos recommandations pour évaluer notre bâtiment. Cependant, la performance énergétique du bâtiment de référence a été comparée aux valeurs de référence pour les bâtiments résidentiels présentes dans le code thermique des bâtiments marocains.

Localisation	Agadir (Maroc)	Tanger (Maroc)	Fès (Maroc)	Ifrane (Maroc)	Marrakech (Maroc)	Errachidia (Maroc)
Chauffage (kWh)	3700.64	8144.06	14559.09	25127.89	6698.97	12055.34
Climatisation (kWh)	6834.19	8465.16	11487.20	8500.78	17819.28	25516.05
Besoins énergétiques totaux (kWh)	10534.83	16609.22	26046.29	33628.68	24518.25	37571.40
Surface totale (m ²)	176	176	176	176	176	176
Performance énergétique du bâtiment (kWh.m ⁻² an ⁻¹)	59.86	94.37	147.99	191.07	139.31	213.47
Performance énergétique selon le RTCM (kWh.m ⁻² an ⁻¹)	66	85	115	195	130	185

Tableau 34 Comparaison des résultats de la simulation avec les valeurs de référence selon le RTCM

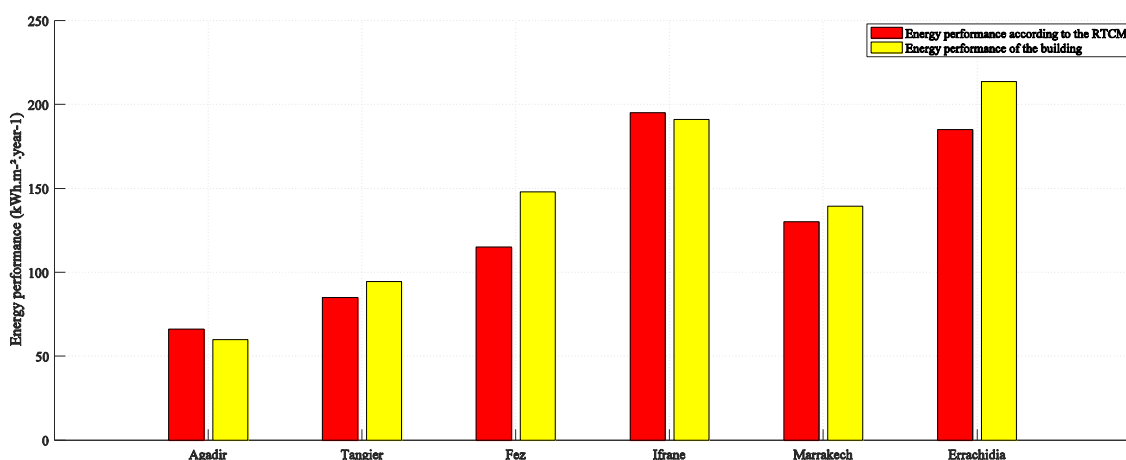


Figure 83 Comparaison des résultats de la simulation avec les valeurs de référence selon le RTCM

Le tableau 34 et la figure 83 montrent que les résultats de la simulation du bâtiment de référence ne répondent pas aux exigences du RTCM à Tanger, Fès, Marrakech et Errachidia. Cela s'explique par le fait que l'indicateur de performance énergétique lié aux exigences thermiques du bâtiment de référence dépasse celui recommandé par le RTCM de 9.37 kWh.m⁻² an⁻¹, 32.99 kWh.m⁻² an⁻¹, 9.31 kWh.m⁻² an⁻¹ et 28.47 kWh.m⁻² an⁻¹ respectivement à Tanger, Fès, Marrakech et Errachidia.

Tandis que les climats d'Agadir et d'Ifrane ont montré que la performance énergétique du bâtiment de référence est inférieure aux valeurs de référence du RTCM. Cela est dû au fait que la composition des murs, les charges internes, etc., sont acceptables avec ce que le RTCM recommande dans ces climats. Toutefois, cela ne signifie pas qu'il s'agit de la perfection.

À cet égard, un plan d'actions d'amélioration est nécessaire, en particulier pour celles qui ne répondent pas aux exigences du RTCM.

2. Performance énergétique du bâtiment optimisé

L'introduction de l'isolation thermique dans la partie passive du bâtiment permet de minimiser sa consommation d'énergie et d'améliorer son confort thermique. Dans cette étude de cas, les particularités prises en compte quant à l'introduction de l'isolation thermique dans la composition de l'enveloppe globale du bâtiment sont les suivantes :

- ❖ 8 cm d'isolation thermique au niveau du toit ;
- ❖ 6cm d'isolation thermique sur les murs extérieurs ;
- ❖ 4cm d'isolation thermique au niveau du plancher bas ;
- ❖ L'emplacement de l'isolation thermique sur les murs est à l'intérieur.

L'épaisseur de l'isolation thermique est prise avec une séquence logique en fonction des pertes thermiques de chaque mur [OLI10].

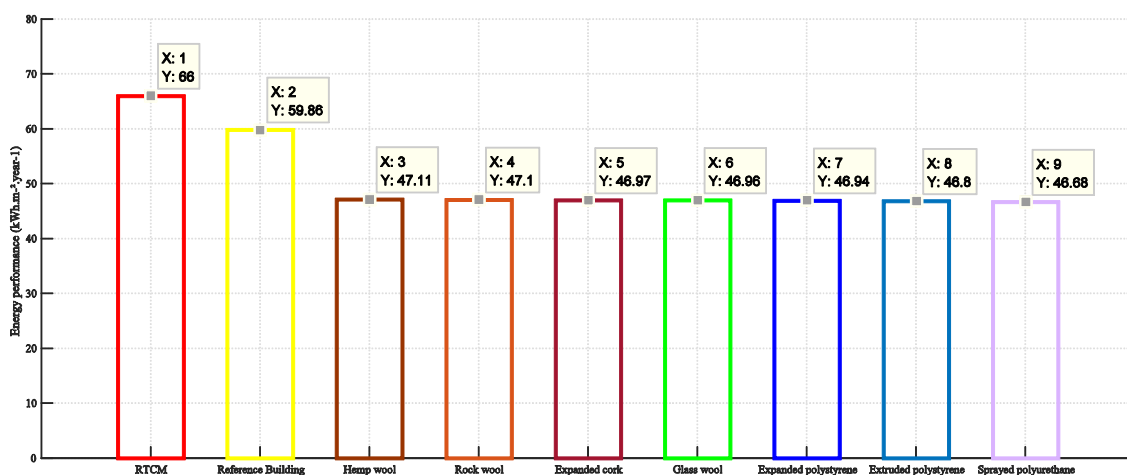


Figure 84 Comparaison des performances énergétiques de différents isolants thermiques par rapport aux valeurs de référence conformément au RTCM pour Agadir

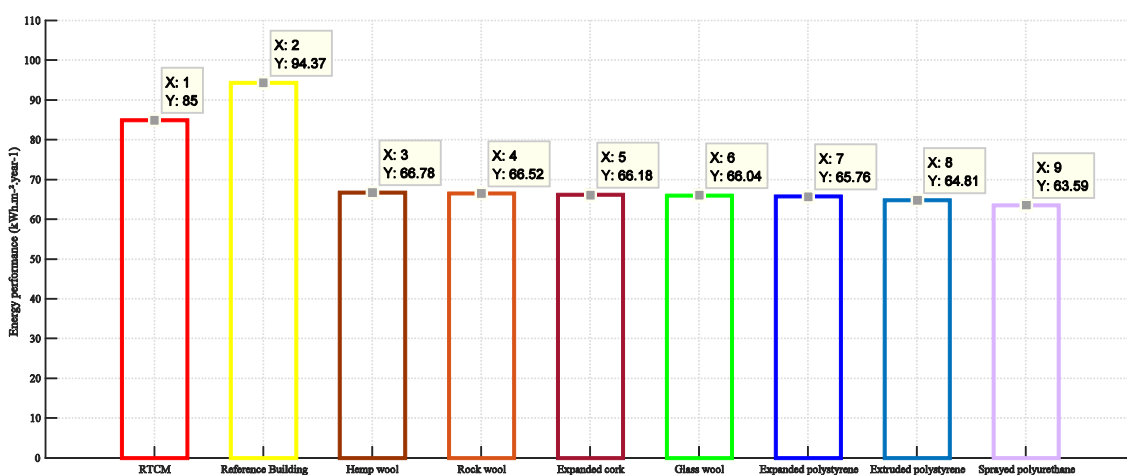


Figure 85 Comparaison des performances énergétiques de différents isolants thermiques par rapport aux valeurs de référence conformément au RTCM pour Tanger

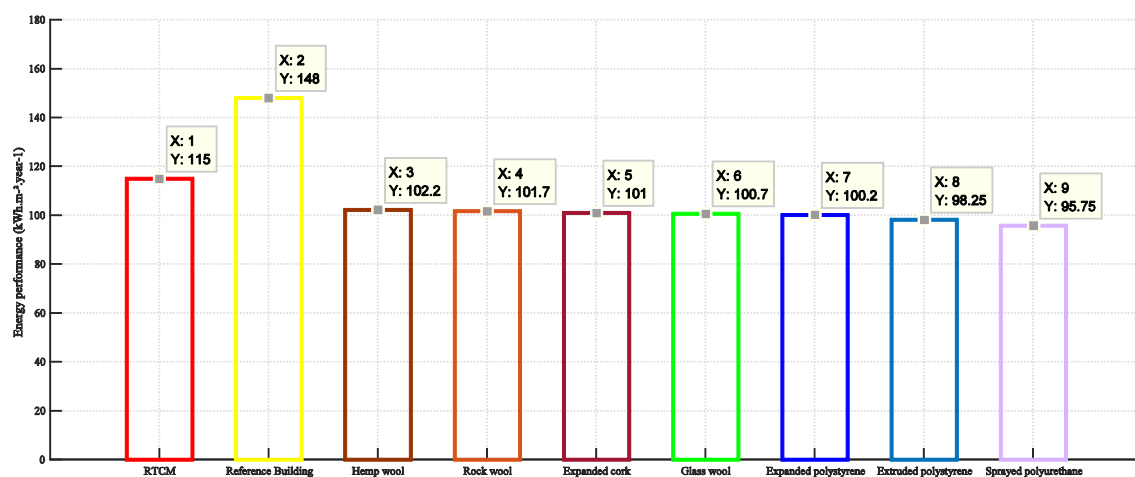


Figure 86 Comparaison des performances énergétiques de différents isolants thermiques par rapport aux valeurs de référence conformément au RTCM pour Fès

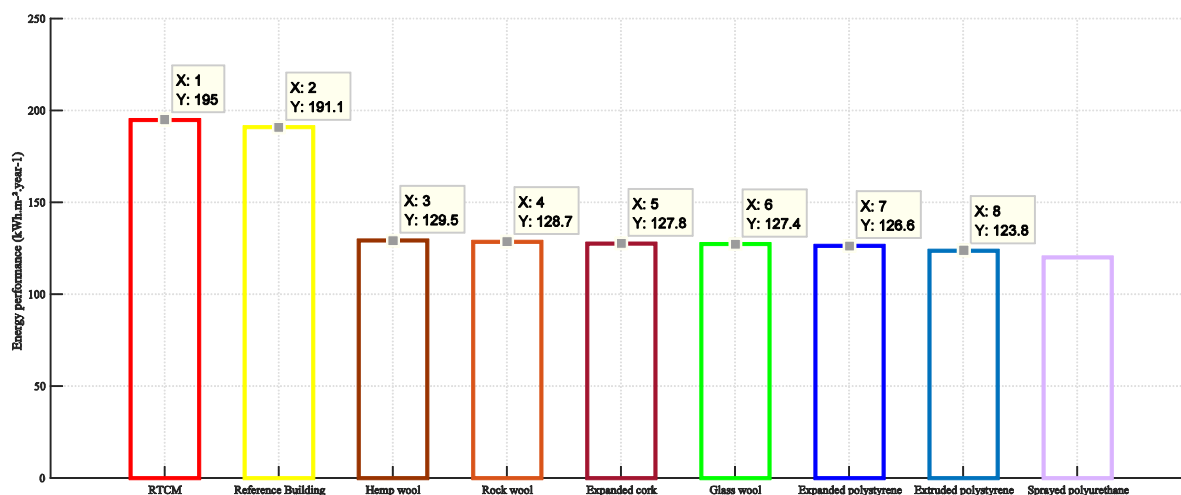


Figure 87 Comparaison des performances énergétiques de différents isolants thermiques par rapport aux valeurs de référence conformément au RTCM pour Ifrane

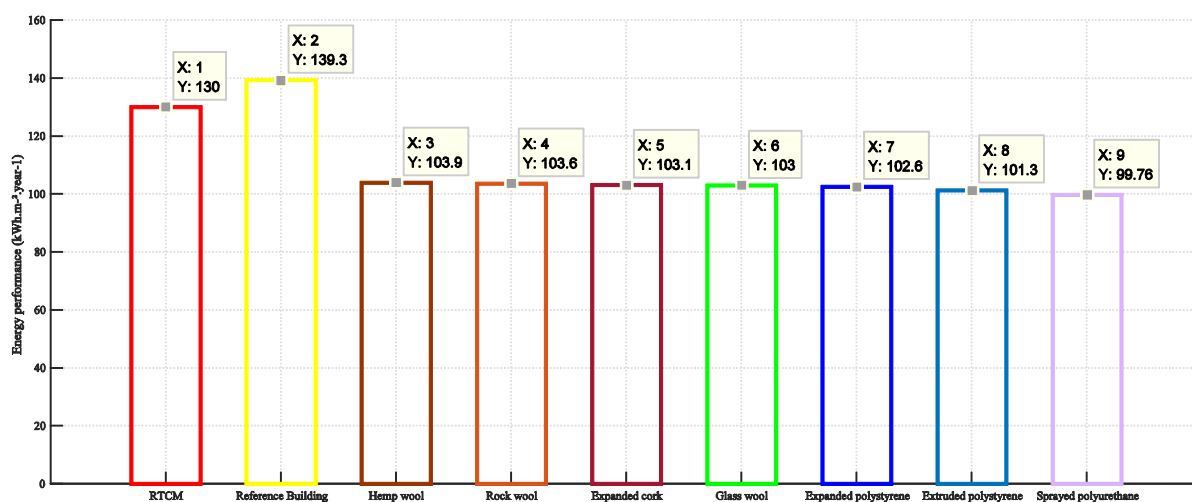


Figure 88 Comparaison des performances énergétiques de différents isolants thermiques par rapport aux valeurs de référence conformément au RTCM pour Marrakech

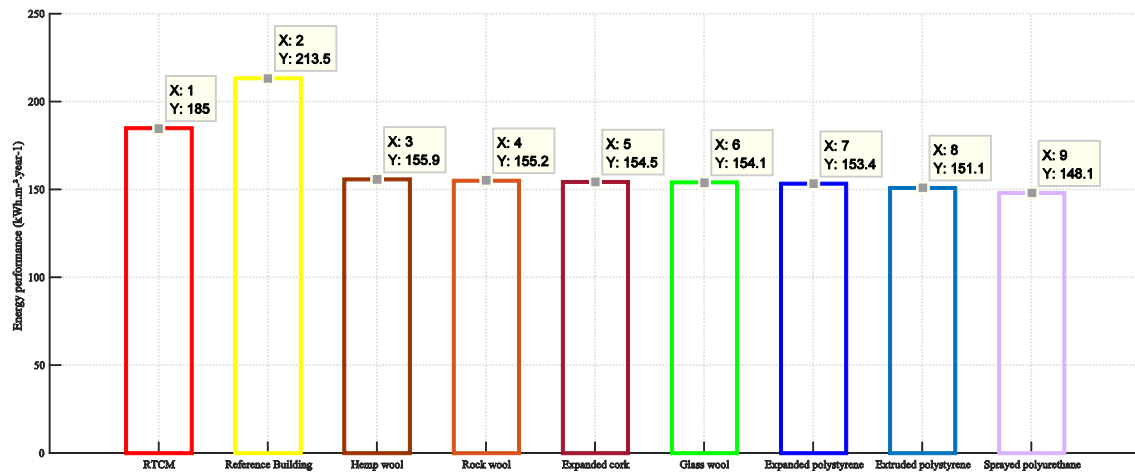


Figure 89 Comparaison des performances énergétiques de différents isolants thermiques par rapport aux valeurs de référence conformément au RTCM pour Errachidia

Les figures 93, 94, 95, 96 et 97 montrent l'impact positif de l'isolation thermique sur la performance énergétique du bâtiment pour les climats étudiés. Il est observé qu'il y a une légère différence entre les différents isolants thermiques en termes de performance énergétique. Cependant, l'isolation thermique la plus efficace, qui a permis de réaliser des économies d'énergie significatives par rapport aux autres, est celle fournie par le polyuréthane projeté. Ce dernier entraîne des réductions importantes de la demande en chauffage et en climatisation, qui représentent respectivement 2318.65 kWh (22.01%), 5416.96 kWh (32.61%), 9194.83 kWh (35.30%), 12476.96 kWh (37.10%), 6961.24 kWh (28.39%) et 11500.25 kWh (30.61%) à Agadir, Tanger, Fès, Ifrane, Marrakech et Errachidia.

3. Taux d'autosuffisance énergétique

Le taux d'autosuffisance énergétique est utilisé dans ce travail comme un paramètre qui permet d'évaluer la production d'énergie électrique, à partir d'une source d'énergie propre et renouvelable, face à la charge requise dans différentes zones climatiques. Il est montré dans la section précédente que le polyuréthane projeté a la plus grande performance énergétique par rapport aux autres isolants thermiques. Ainsi, l'autosuffisance énergétique sera étudiée sur le cas de base, puis sur le cas optimisé où le bâtiment en question est isolé par du polyuréthane projeté. Cela commencera par le cas de base afin d'avoir des résultats de référence avec lesquels on pourra évaluer le cas optimisé.

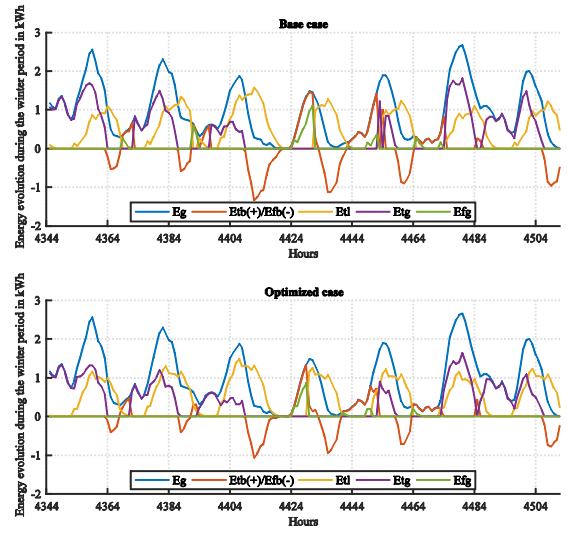
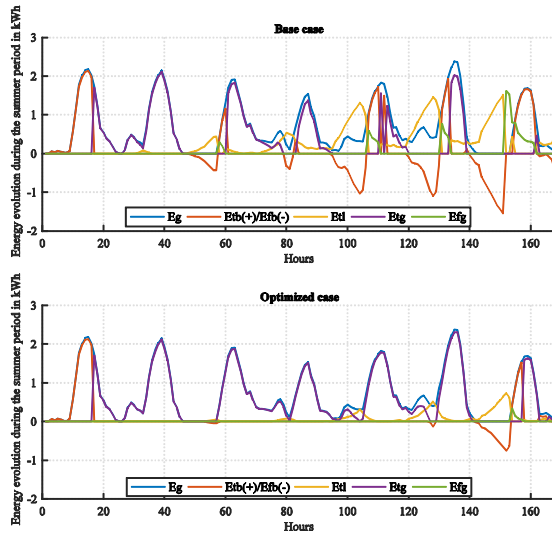


Figure 90 Comparaison de l'évolution de l'autosuffisance énergétique entre le cas de base et le cas optimisé pour Agadir

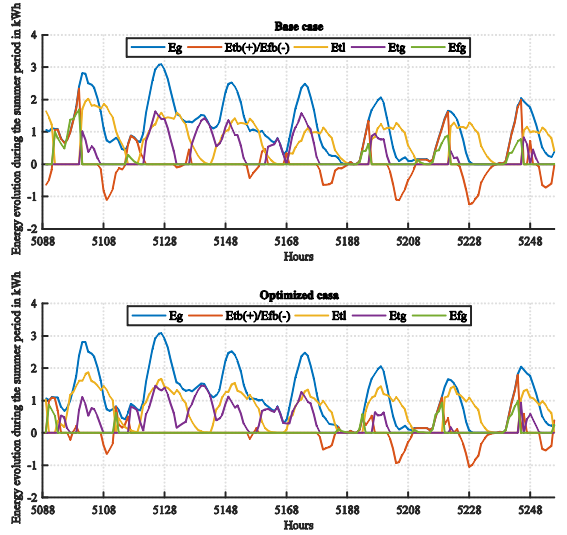
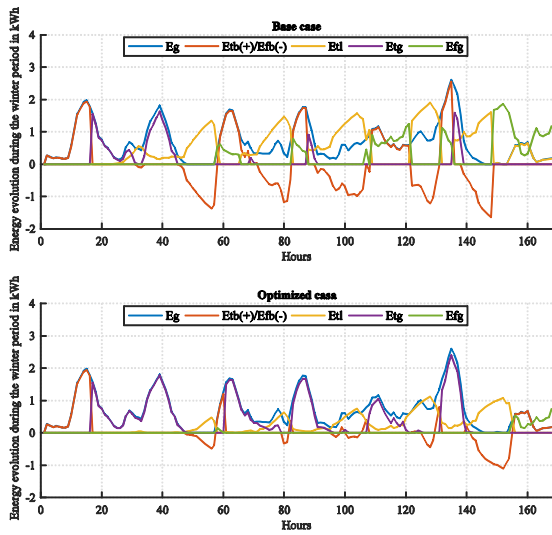


Figure 91 Comparaison de l'évolution de l'autosuffisance énergétique entre le cas de base et le cas optimisé pour Tanger

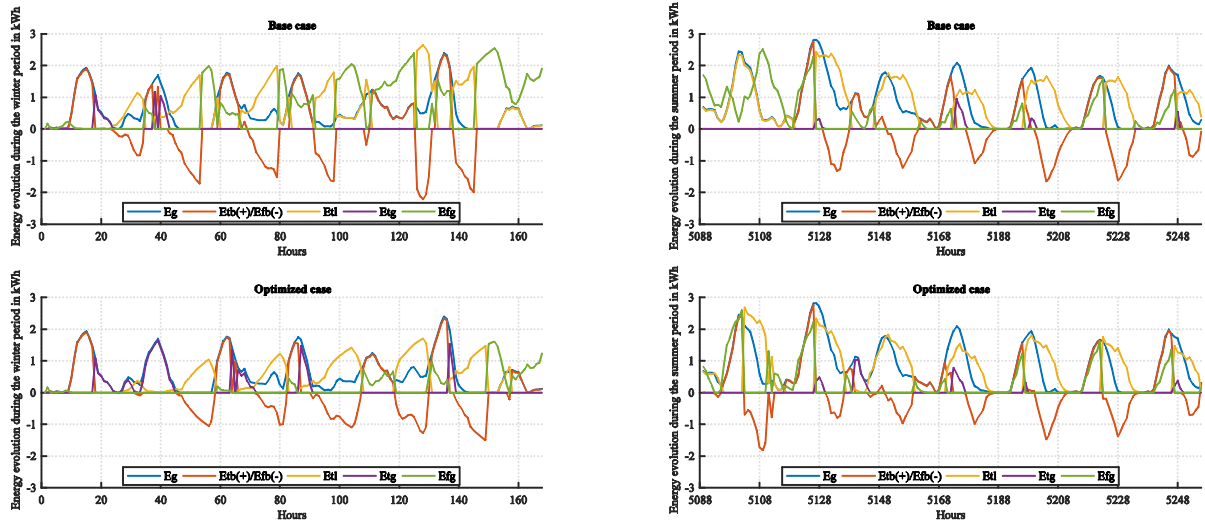


Figure 92 Comparaison de l'évolution de l'autosuffisance énergétique entre le cas de base et le cas optimisé pour Fès

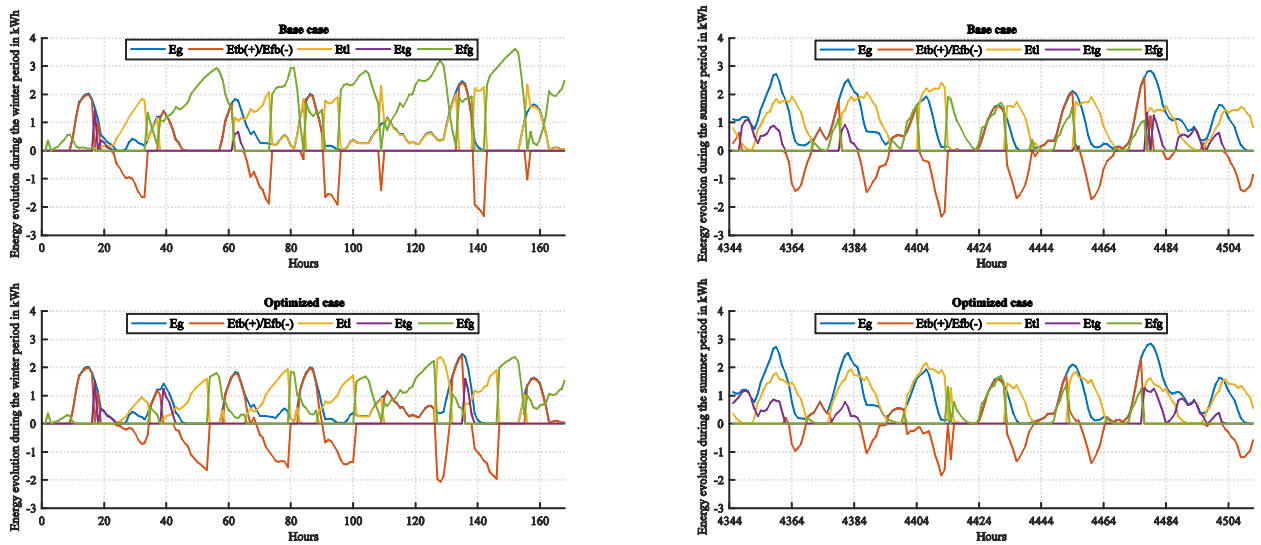


Figure 93 Comparaison de l'évolution de l'autosuffisance énergétique entre le cas de base et le cas optimisé pour Ifrane

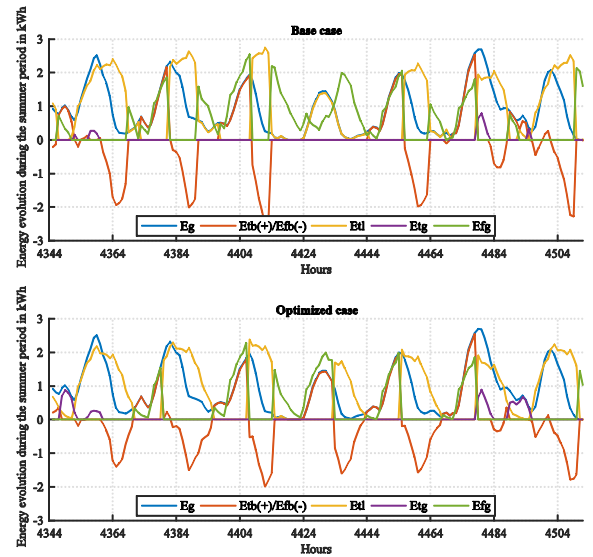
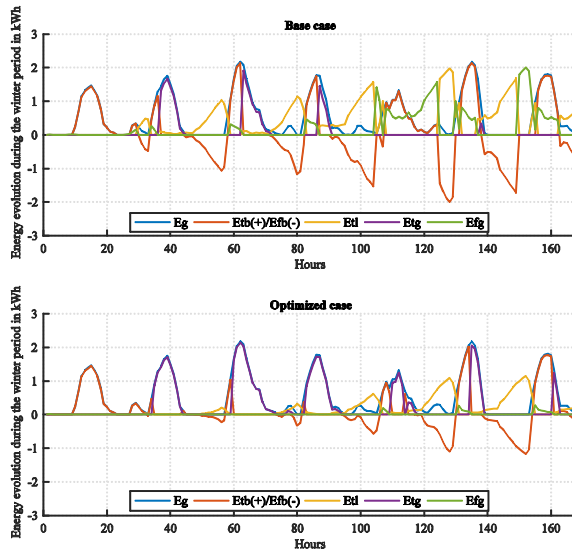


Figure 94 Comparaison de l'évolution de l'autosuffisance énergétique entre le cas de base et le cas optimisé pour Marrakech

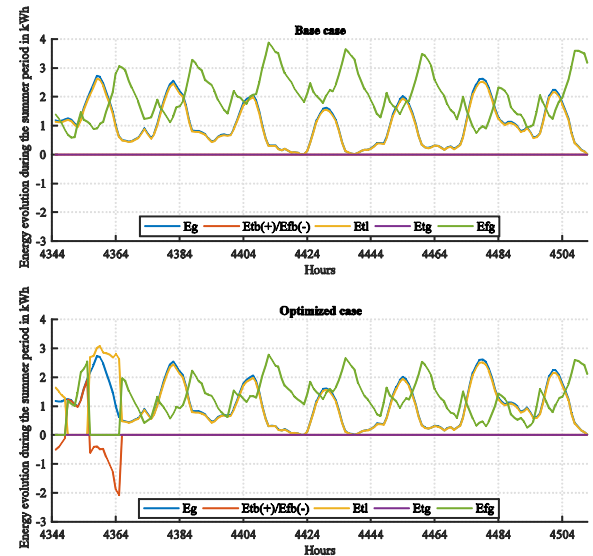
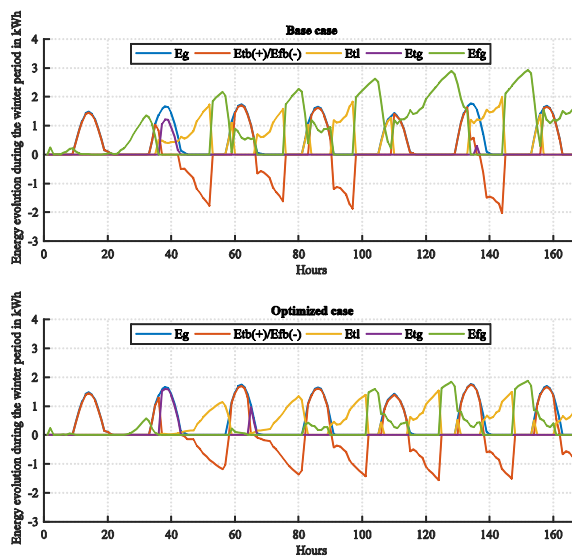


Figure 95 Comparaison de l'évolution de l'autosuffisance énergétique entre le cas de base et le cas optimisé pour Errachidia

Les résultats de simulation présentés dans les figures 98, 99, 100, 101, 102 et 103 montrent la variation de l'énergie électrique mobilisée entre les deux côtés de la production et de la charge en fonction du temps dans les villes étudiées. Cette variation est basée sur les actions des différents composants électriques, bien que la raison principale soit due aux facteurs suivants, puisque la production d'électricité à partir de sources renouvelables et nouvelles dépend principalement des conditions climatiques :

- ✓ Le rayonnement solaire ;
- ✓ La température extérieure ;
- ✓ Vitesse du vent ;
- ✓ Période de simulation.

On observe que lorsque la charge diminue, bien dans le cas optimisé, l'énergie provenant du réseau électrique diminue également. Cela prouve qu'il y a une amélioration du niveau de satisfaction énergétique.

Cas de base	Agadir (Maroc)	Tanger (Maroc)	Fès (Maroc)	Ifrane (Maroc)	Marrakech (Maroc)	Errachidia (Maroc)
E_g [kWh]	7486.90	9900.65	7462.65	6727.66	6419.96	6714.19
E_{fb} [kWh]	-992.69	-1143.12	-1589.18	-1560.55	-1502.37	-1325.27
E_{tb} [kWh]	1022.97	1176.97	1626.73	1600.63	1543.00	1361.16
E_d [kWh]	2702.00	4088.19	4412.39	4270.82	3983.56	4630.50
E_{tg} [kWh]	4549.74	5497.16	2773.41	2195.05	2186.08	1819.02
E_{fg} [kWh]	895.23	1480.10	4239.90	6617.64	4473.90	8249.67
Consommation électrique de chauffage [kWh]	1156.45	2545.02	4549.71	7852.47	2093.43	3767.30
Consommation électrique de climatisation [kWh]	2440.78	3023.27	4102.57	3035.99	6364.03	9112.88

Tableau 35 Différents flux énergétiques annuels en kWh pour le cas de base dans les villes étudiées

Cas optimisé	Agadir (Maroc)	Tanger (Maroc)	Fès (Maroc)	Ifrane (Maroc)	Marrakech (Maroc)	Errachidia (Maroc)
E_g [kWh]	7486.90	9900.64	7462.65	6727.66	6419.96	6714.19
E_{fb} [kWh]	-560.80	-652.75	-1350.84	-1657.21	-1140.79	-1298.43
E_{tb} [kWh]	583.83	677.32	1387.09	1696.09	1175.22	1329.80
E_d [kWh]	2446.50	3277.67	3749.86	3846.65	3612.45	4424.63
E_{tg} [kWh]	4817.70	6333.50	3450.76	2629.08	2570.96	2033.61
E_{fg} [kWh]	432.38	565.89	1950.29	3094.93	2534.29	4623.98
Consommation électrique de chauffage [kWh]	388.32	1075.75	2227.58	4287.72	865.34	1837.62
Consommation électrique de climatisation [kWh]	2490.56	2767.81	3472.57	2653.84	5281.40	7210.98

Tableau 36 Différents flux énergétiques annuels en kWh pour le cas optimisé dans les villes étudiées

Les tableaux 35 et 36 viennent de préciser la distribution annuelle de l'énergie entre la production et la charge. A travers ces tableaux, on peut constater que l'énergie produite à partir de sources d'énergie renouvelables est la même dans les deux cas, ce qui est logique puisque nous avons le même système de production.

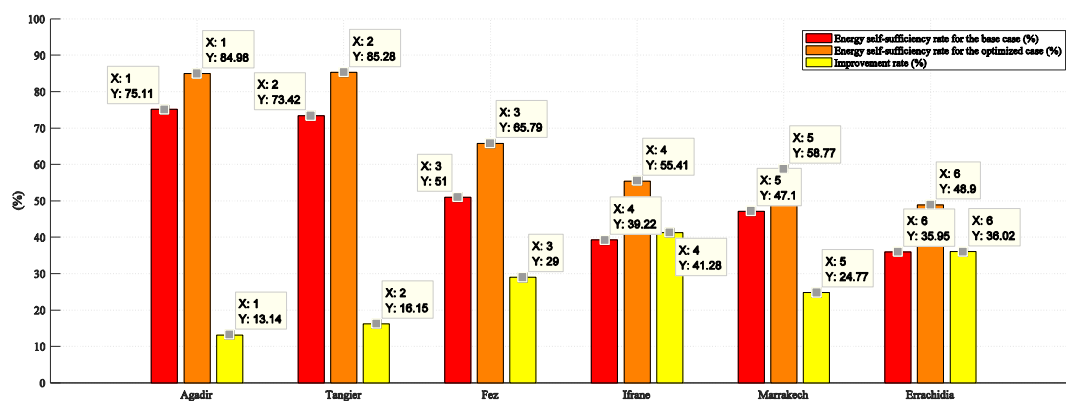


Figure 96 Comparaison du taux d'autosuffisance énergétique entre le cas de base et le cas optimisé dans les villes étudiées

L'énergie au niveau de la batterie (+ et -) et l'énergie provenant du réseau électrique ont été réduites dans le cas optimisé par rapport au cas de base. Cela s'explique par le fait que, lorsque la charge diminue, la demande d'énergie électrique devient moins importante dans le cas optimisé que dans le cas de base. L'énergie injectée dans le réseau électrique est augmentée dans le cas optimisé par rapport au cas de base. Cela s'explique par le fait qu'il y a moins de charge et que le stockage d'énergie au niveau de la batterie est minimal dans le cas optimisé. Par conséquent, un excès d'énergie électrique apparaît disponible qui sera ensuite injecté dans le réseau public.

Les résultats illustrés dans la figure 96 montrent l'impact de la partie passive du bâtiment, en particulier celui de l'isolation thermique, sur l'autosuffisance énergétique pour laquelle les valeurs sont très significatives. Ces valeurs suggèrent que l'autosuffisance énergétique du bâtiment étudié est potentiellement améliorée dans tous les climats étudiés. Ce potentiel d'amélioration a atteint des pourcentages de 13.14%, 16.15%, 29%, 41.28%, 24.77% et 36.02% respectivement à Agadir, Tanger, Fès, Ifrane, Marrakech et Errachidia.

Enfin, il convient de noter que l'introduction de l'isolation thermique, en tant que paramètre intrinsèque de la partie passive du bâtiment, peut améliorer l'autosuffisance énergétique en termes d'alimentation électrique avec un taux qui s'élève à la moitié de la situation de base. Cela se fait sur la même longueur d'onde avec le principe d'appliquer d'abord l'efficacité énergétique, puis d'introduire les énergies renouvelables.

VII. Conclusion

Dans ce présent chapitre, j'ai présenté les travaux de recherche ce qui concerne la thèse de B.Chegari. Dans cette thèse, les travaux ont été orientés vers l'étude d'un bâtiment marocain typique de R+1 sous différents climats, à savoir Agadir, Tanger, Fès, Ifrane, Marrakech, Errachidia. L'environnement TRNSYS, couplé à celui du TRNBuild multizone, nous a permis de concevoir et de développer une plateforme pour évaluer, numériquement et en temps réel, l'impact de la partie passive du bâtiment sur son autosuffisance énergétique. Dans ce cas, il s'agissait de l'impact de l'isolation thermique sur l'autosuffisance énergétique du bâtiment, étant donné que le système de production d'énergie utilisé est un système hybride combinant l'énergie éolienne et photovoltaïque. Les résultats ont montré que l'impact de l'isolation thermique sur l'autosuffisance énergétique du bâtiment dans tous les climats étudiés est très important, en particulier dans les climats qui semblent similaires à celui de la ville d'Ifrane (Maroc). Étant donné que l'autosuffisance énergétique dans ce climat a été améliorée de 41,28% de plus que la situation de référence. En effet, elle contribue tout d'abord à atteindre le confort thermique en réduisant les pertes d'énergie, ce qui entraîne un potentiel d'économie très important. Par conséquent, elle a un impact énorme sur les tendances énergétiques et environnementales mondiales, ce qui permet d'éviter de manière significative les émissions de gaz à effet de serre.

Conclusion et perspectives

Ces dernières années, les technologies de l'information et de la communication ont constitué les bases de la transformation numérique pour l'industrie du futur. L'évolution de ces technologies assurent une transformation de plusieurs secteurs notamment la production, l'automatisation, l'énergie, l'industrie médicale et autres. Actuellement, l'ensemble des révolutions ont pu d'une part, proposer des solutions afin d'améliorer les besoins et les processus industriels et d'autres part, améliorer les moyens de vie des citoyens et leurs faciliter l'accès à plusieurs services.

L'intelligence artificielle, les objets connectés, les robots autonomes et Big data permettent actuellement de fournir les moyens et les outils nécessaires des décisions intelligentes pour améliorer les mécanismes industriels ainsi que de renforcer l'industrie d'un pays et d'améliorer la qualité de vie sociétale. L'intégration de ces technologies dans des services diverses a accéléré la mise en place de plusieurs modèles industriels innovants. Cette vague des révolutions est initiée par le gouvernement allemand, consiste à une intégration de la nouvelle technologie dans des secteurs industriels, nommé « industrie 4.0 ». D'autres modèles ont vu le jour après cette initiative à savoir : le modèle japonais connu par « society 5.0 » et le modèle chinois nommé « Made in chine 2025 ».

C'est à partir de ce constat mondial que j'ai mis en place la thématique générale de recherche au sein de l'équipe PRI de l'EMSI, en concertation avec l'équipe ASC de l'Université de Lorraine, concernant les systèmes électroniques intelligents pour l'industrie du futur. Ce choix de thématiques résulte, d'une part, des compétences pluridisciplinaires de l'équipe ainsi que les collaborateurs et d'autre part, de la synergie mise en place entre la formation en science de l'ingénieur, les axes de recherches pluridisciplinaires et les collaborateurs.

Sur le plan de la formation au sein de l'EMSI, ceci s'est traduit par la mise en place et le suivi d'un ensemble des modules pour les filières : « Ingénierie Informatique et Réseau », « Automatismes et Informatique Industrielle » et « Génie Industriel ». La majorité de ces modules de formations sont développés via le soutien des masters délocalisés français, notamment les masters RSEF (Radiocommunications et Systèmes Electroniques Fiables) et GSI (Génie des Systèmes Industriels) de l'Université de Lorraine, initié par Pr A. Dandache.

Sur le plan de la recherche, la thématique porte plus particulièrement sur le développement des systèmes industriels futur pour les transmissions et analyse des données ainsi que la gestion d'énergie. La pluridisciplinarité des domaines m'a conduit, en concertation avec Prs. A. Dandache et F. Monteiro, à une organisation transversale de la recherche où, au sein de mon équipe, les compétences de chacun de membres des équipes PRI et ASC sont utilisées au mieux sur l'ensemble des projets et thématiques. Le thème fédérateur des activités de recherches porte sur le développement des services pour les applications de l'industrie de futur, est décliné en trois actions principales, dont j'apporte ma contribution :

- Conception architecturale et matérielle pour des applications de transmission sans fil dans un milieu fortement bruité.

- Traitement et analyse de données pour une meilleure prise de décision, application au secteur médicale et énergétique.
- Management des énergies renouvelables à travers les architectures d'hybridation énergétique pour un meilleur confort antérieur dans le bâtiment.

Dans ce manuscrit, je présente une synthèse des principaux travaux auxquels j'ai apporté mes connaissances et compétences, et qui ont fait l'objet des thèses et des collaborations. Les chapitres principaux se divisent en quatre parties :

La première partie est consacrée à l'intérêt présenté par les différentes révolutions industrielles. L'accent est mis sur l'historique de développement de l'industrie ainsi que les modèles inspirants de la révolution « industrie 4.0 ». L'intégration des nouvelles technologies ainsi que leurs impacts sur des domaines transversales a été aussi discuter.

La deuxième partie porte sur le développement des aspects architecturaux et matériels dans un contexte industriel. Cette partie est développée sous forme de deux chapitres. Le premier chapitre présente le développement des aspects de transmissions sans fil dans un milieu fortement bruité. Deux architectures ont été développées : many-to-one et one-to-many, en se basant sur IDWPT en émission et DWPT en réception. Les performances ont été étudiées pour deux types de canaux : AWGN et industriel (impulsionnel bruité). Aussi en considérant l'intégration des codes correcteurs d'erreurs et la comparaison avec l'architecture OFDM. Le deuxième chapitre a pour objectif le développement des architectures matériels IDWPT et DWPT pour l'implémentation sur des cibles FPGA. Une architecture générique pour des applications de transmission sans fil est développée, reposant sur le coût de la mise en œuvre, fonctionnement sans mémoires, réduction des DSP ainsi que le développement d'une architecture intelligente du filtre FIR.

La troisième partie est consacrée au développement des outils et algorithmes d'analyse pour le traitement des données ayant pour objectif une meilleure prise de décision. Les travaux développés dans cet axe visent d'une part, dans le premier chapitre de cette partie, les méthodes d'extraction et de classification des données pour le diagnostic automatisé dans le cas des pathologies cardiologiques et d'autres part, le développement des modèles de prévision énergétique de la puissance des PV combinant les modèles de séries temporelles et la non-linéarité des modèles d'apprentissage statistiques, représentant les travaux du deuxième chapitre de cette partie.

La quatrième partie a porté sur le développement des architectures de gestion, management et contrôle des énergies propres dans le cadre des villes intelligentes. Le premier chapitre est consacré au développement des architectures d'hybridation et contrôle des sources énergétiques propres. Une architecture à base des PV-Eolienne-batterie connectée au réseau électrique est détaillée dans ce chapitre. Une gestion intelligente de micro-réseau des maisonnettes connectées est aussi développée, pour le partage d'énergie collaboratif. Le deuxième chapitre est consacré au développement d'une plateforme pour le développement des bâtiments passifs via TRNSYS sous différents climats au Maroc. Les résultats ont montré qu'il y'a un impact de l'isolation thermique sur l'autosuffisance énergétique du bâtiment.

Les perspectives à court et moyen terme se situent dans la continuité des différentes thématiques actuelle. Il s'agit en effet de mener à terme les actions liées à l'intégration massive du numérique pour des applications visant l'industrie du futur.

Sur le volet transmission sans fil, à court terme, les travaux visent le développement des aspects architecturaux de communication fiables pour la numérisation des usines futures. Il s'agit d'une part, de développer les différents modes de communication reposant sur la pyramide de CIM et d'autres part, le

développement des canaux de communication adaptés aux environnements industriels, gérant ainsi la mobilité, différents types d'obstacles, la nature des surfaces utilisés ainsi que d'autres paramètres. A long terme, le développement des architectures à faible coût pour la mise en œuvre sur la plateforme FPGA. L'idée est aussi de poursuivre à renforcer les stratégies d'implémentation des émetteurs et récepteurs prenant en considération l'environnement industriel.

Sur le volet de traitement intelligent de données, à court terme le renforcement des outils et méthodes d'analyses des données afin d'améliorer la précision et de faciliter la prise de décision. Il s'agit de généraliser les résultats déjà obtenus, du diagnostic automatisé à travers les différentes méthodes d'extraction et classification pour gérer au mieux les problèmes cardiovasculaires. A long terme, les travaux viseront d'une part un accès optimisé d'un patient dans l'hôpital en minimisant le temps d'attente et gérant au mieux les ressources humaines et matérielles. L'idée consiste au développement de différents algorithmes de machine Learning et réseaux de neurones pour une meilleure prédiction.

Quant au volet énergétique, il faut optimiser, à court terme, les différentes architectures de contrôle et basculement des différentes énergies propres pour les villes intelligentes. Il s'agit aussi d'intégrer l'aspect mobilité des véhicules électriques. Le défi consiste à équilibrer les différentes charges, aussi bien pour la maison que pour les véhicules électriques pour un trajet spécifique au sein de la ville. A long terme, il s'agit du développement des outils d'intelligence pour le bâtiment d'une part, pour optimiser les performances énergétiques vers un modèle purement passif et d'autres part, pour améliorer le confort antérieur d'un citoyen en intégrant une stratégie d'enveloppe énergétique, respectant différents confort : thermique, acoustique et visuelle.

Sur le plan de la structuration de l'activité de recherche, à court terme, il s'agit de poursuivre les travaux de recherche de mon équipe et surtout renforcer les liens industriels et la synergie déjà mise en place entre l'enseignement et la recherche à travers l'industrie. Quant aux coopérations, il s'agit de renforcer l'ensemble des collaborations déjà établies et de mettre en place d'autres collaborations stratégiques pour l'équipe et pour l'EMSI. Sur le plan personnel, mes travaux vont s'orienter vers l'intégration du numérique dans les processus industriels à travers deux éléments clés : i) les architectures de communication sans fils, ii) les outils numériques d'aide à la décision. Mon projet de recherche s'articulera autour des deux secteurs applicatifs : « industrie 4.0 » et « Villes intelligentes ».

Références

- [LU17] LU, Yang. Industry 4.0: A survey on technologies, applications and open research issues. *Journal of industrial information integration*, 2017, vol. 6, p. 1-10.
- [LAS14] LASI, Heiner, FETTKE, Peter, KEMPER, Hans-Georg, *et al.* Industry 4.0. *Business & information systems engineering*, 2014, vol. 6, no 4, p. 239-242
- [SKO17] Skobelev, P. O., and S. Yu Borovik. "On the way from Industry 4.0 to Industry 5.0: From digital manufacturing to digital society." *Industry 4.0 2.6* (2017): 307-311.
- [OZD18] Özdemir, Vural, and Nezih Hekim. "Birth of industry 5.0: Making sense of big data with artificial intelligence, "the internet of things" and next-generation technology policy." *Omicron: a journal of integrative biology* 22.1 (2018): 65-76.
- [NAH19] Nahavandi, Saeid. "Industry 5.0—A human-centric solution." *Sustainability* 11.16 (2019): 4371.
- [CLA19] GLASER, Bonnie S. Made in china 2025 and the future of American industry. *Center for Strategic International Studies*, 2019.
- [LIN20] LIN, Yue. 'Made in China 2025' and China's cross-border strategic M&As in OECD countries. *Journal of Chinese Economic and Business Studies*, 2020, p. 1-24.
- [KOL20] KLOMFASS, Dana. Discourse on the 'Made in China 2025' Strategy in Germany. 2020.
- [FUK20] FUKUDA, Kayano. Science, technology and innovation ecosystem transformation toward society 5.0. *International Journal of Production Economics*, 2020, vol. 220, p. 107460.
- [BAL20] BALI SWAIN, Ranjula et YANG-WALLENTIN, Fan. Achieving sustainable development goals: predicaments and strategies. *International Journal of Sustainable Development & World Ecology*, 2020, vol. 27, no 2, p. 96-106.
- [SAL19] Salimova, T., Guskova, N., Krakovskaya, I., & Sirota, E. (2019, March). From industry 4.0 to Society 5.0: Challenges for sustainable competitiveness of Russian industry. In *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering* (Vol. 497, No. 1, p. 012090). IOP Publishing.
- [ZHA20] ZHANG, Chaofeng, DONG, Mianxiong, et OTA, Kaoru. Enabling Computational Intelligence for Green Internet of Things: Data-Driven Adaptation in LPWA Networking. *IEEE Computational Intelligence Magazine*, 2020, vol. 15, no 1, p. 32-43.
- [SIS20] Sisinni, E., Saifullah, A., Han, S., Jennehag, U., & Gidlund, M. (2018). Industrial internet of things: Challenges, opportunities, and directions. *IEEE Transactions on Industrial Informatics*, 14(11), 4724-4734.
- [YOU20] Younan, M., Houssein, E. H., Elhoseny, M., & Ali, A. A. (2020). Challenges and recommended technologies for the industrial internet of things: A comprehensive review. *Measurement*, 151, 107198.
- [BUC20] Büchi, G., Cugno, M., & Castagnoli, R. (2020). Smart factory performance and Industry 4.0. *Technological Forecasting and Social Change*, 150, 119790.
- [OST20] OSTERRIEDER, Philipp, BUDDE, Lukas, et FRIEDLI, Thomas. The smart factory as a key construct of industry 4.0: A systematic literature review. *International Journal of Production Economics*, 2020, vol. 221, p. 107476.
- [RUS02] RUSSELL, Stuart et NORVIG, Peter. Artificial intelligence: a modern approach. 2002.
- [GOG93] FOGEL, David Bruce. Evolving artificial intelligence. 1993.
- [NAR20] NARCISO, Diogo AC et MARTINS, F. G. Application of machine learning tools for energy efficiency in industry: A review. *Energy Reports*, 2020, vol. 6, p. 1181-1199.

- [TUB19] Tubaro, Paola, and Antonio A. Casilli. "Micro-work, artificial intelligence and the automotive industry." *Journal of Industrial and Business Economics* 46.3 (2019): 333-345.
- [HAL17] Hall, Wendy, and Jérôme Pesenti. "Growing the artificial intelligence industry in the UK." *Department for Digital, Culture, Media & Sport and Department for Business, Energy & Industrial Strategy. Part of the Industrial Strategy UK and the Commonwealth* (2017).
- [GUO11] Guo, Z. X., et al. "Applications of artificial intelligence in the apparel industry: a review." *Textile Research Journal* 81.18 (2011): 1871-1892.
- [ELZ19] EL ZAATARI, Shirine, MAREI, Mohamed, LI, Weidong, et al. Cobot programming for collaborative industrial tasks: An overview. *Robotics and Autonomous Systems*, 2019, vol. 116, p. 162-180.
- [TAO18] Tao, F., Cheng, J., Qi, Q., Zhang, M., Zhang, H., & Sui, F. (2018). Digital twin-driven product design, manufacturing and service with big data. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 94(9-12), 3563-3576.
- [TAO18] Tao, F., Cheng, J., Qi, Q., Zhang, M., Zhang, H., & Sui, F. (2018). Digital twin-driven product design, manufacturing and service with big data. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 94(9-12), 3563-3576.
- [GRI17] Grieves, Michael, and John Vickers. "Digital twin: Mitigating unpredictable, undesirable emergent behavior in complex systems." *Transdisciplinary perspectives on complex systems*. Springer, Cham, 2017. 85-113.
- [MUK20] Mukta, M. Y., Rahman, M. A., Asyhari, A. T., & Bhuiyan, M. Z. A. (2020). IoT for energy efficient green highway lighting systems: Challenges and issues. *Journal of Network and Computer Applications*, 158, 102575.
- [SAL19] Saleem, Y., Crespi, N., Rehmani, M. H., & Copeland, R. (2019). Internet of things-aided smart grid: technologies, architectures, applications, prototypes, and future research directions. *IEEE Access*, 7, 62962-63003.
- [DIL20] Dileep, G. (2020). A survey on smart grid technologies and applications. *Renewable Energy*, 146, 2589-2625.
- [ALT19] Al-Turjman, F., & Abujubbeh, M. (2019). IoT-enabled smart grid via SM: An overview. *Future Generation Computer Systems*, 96, 579-590.
- [ISM19] Ismagilova, E., Hughes, L., Dwivedi, Y. K., & Raman, K. R. (2019). Smart cities: Advances in research—An information systems perspective. *International Journal of Information Management*, 47, 88-100.
- [ZAN19] ZANTALIS, Fotios, KOULOURAS, Grigorios, KARABETSOS, Sotiris, et al. A review of machine learning and IoT in smart transportation. *Future Internet*, 2019, vol. 11, no 4, p. 94.
- [YAN20] YAN, Jianghui, LIU, Jinping, et TSENG, Fang-Mei. An evaluation system based on the self-organizing system framework of smart cities: A case study of smart transportation systems in China. *Technological Forecasting and Social Change*, 2020, vol. 153, p. 119371.
- [RUO19] RUOHOMAA, Heikki J. et SALMINEN, Vesa K. Mobility as a service in smart cities-new concept for smart mobility in Industry 4.0 framework. In : *ISPIM Conference Proceedings*. The International Society for Professional Innovation Management (ISPIM), 2019. p. 1-12.
- [WOL17] Wollschlaeger, M.; Sauter, T.; Jasperneite, J. The future of industrial communication: Automation networks in the era of the internet of things and industry 4.0. *IEEE Ind. Electron. Mag.* 2017, 11, 17-27.
- [CHE16] Cheffena, M. Propagation channel characteristics of industrial wireless sensor networks [wireless corner]. *IEEE Antennas Propag. Mag.* 2016, 58, 66-73.
- [LAS06] Lakshmanan, M.K.; Nikookar, H. A review of wavelets for digital wireless communication. *Wirel. Pers. Commun.* 2006, 37, 387-420.
- [TAB16] Tabaa, M. A novel transceiver architecture based on wavelet packet modulation for UWB-IR WSN applications. *Wirel. Sens. Netw.* 2016, 8, 191-209.
- [SAU10] Sauter, T. The three generations of field-level networks—Evolution and compatibility issues. *IEEE Trans. Ind. Electron.* 2010, 57, 3585-3595.
- [AND12] Andersson, M. Wireless Technologies for Industrial Applications (Version 2.2 Feb 2013). Connect Blue. Available online: <https://www.digikey.com/en/articles/techzone/2012/jan/wireless-technologies-for-industrial-applications> (accessed on 5 January 2012).

- [SAS15] Sasajima, H.; Ishikuma, T.; Hayashi, H. Future IIOT in process automation—Latest trends of standardization in industrial automation, IEC/TC65. In Proceedings of the 54th Annual Conference of the Society of Instrument and Control Engineers of Japan (SICE), Hangzhou, China, 28–30 July 2015; pp. 963–967.
- [SAL18] Saleh, N.; Kassem, A.; Haidar, A.M. Energy-efficient architecture for wireless sensor networks in healthcare applications. *IEEE Access* 2018, 6, 6478–6486.
- [DAU92] Daubechies, I. Ten Lectures on Wavelets; Society for Industrial and Applied Mathematics: Philadelphia, PA, USA, 1992; 357p.
- [MAL89] Mallat, S. A Wavelet Tour of Signal Processing; Academic Press: Cambridge, MA, USA, 1989.
- [SHA09] Shan, Q.; Bhatti, S.; Glover, I.A.; Atkinson, R.; Portugues, I.E.; Moore, P.J.; Rutherford, R. Characteristics of impulsive noise in electricity substations. In Proceedings of the 2009 17th European Signal Processing Conference, Glasgow, UK, 24–28 August 2009; pp. 2136–2140.
- [SEX05] Sexton, D.; Mahony, M.; Lapinski, M. Radio channel quality in industrial wireless sensor networks. In Proceedings of the 2005 Sensors for Industry Conference, Houston, TX, USA, 8–10 February 2005; pp. 88–94.
- [LUO11] Luo, S.; Polu, N.; Chen, Z.; Slipp, J. RF channel modeling of a WSN testbed for industrial environment. In Proceedings of the 2011 IEEE Radio and Wireless Symposium, Phoenix, AZ, USA, 16–19 January 2011; pp. 375–378.
- [SAL87] Saleh, A.A.M.; Valenzuela, R. A statistical model for indoor multipath propagation. *IEEE J. Sel. Areas Commun.* 1987, 5, 128–137.
- [KAR07] Karedal, J. A measurement-based statistical model for industrial ultra-wideband channels. *IEEE Trans. Wirel. Commun.* 2007, 6, 8.
- [CHE12] Cheffena, M. Industrial wireless sensor networks: Channel modeling and performance evaluation. *EURASIP J. Wirel. Commun. Netw.* 2012, 297, 1–8.
- [SAA15] Saadaoui, S.; Tabaa, M.; Monteiro, F.; Dandache, A.; Alami, K. A new WSN transceiver based on DWPT for WBAN applications. In Proceedings of the International conference on Microelectronics ICM (2015), Casablanca, Morocco, 20–23 December 2015.
- [LI12] Li, L. Energy-Efficient Design and Implementation of Turbo Codes for Wireless Sensor Network. Ph.D. Thesis, University of Southampton, Southampton, UK, 2012.
- [SCH09] Schmidt, D.; Berning, M.; Wehn, N. Error correction in single-hop wireless sensor networks: A case study. In Proceedings of the Conference on Design, Automation and Test, Nice, France, 20–24 April 2009; pp. 1296–1301.
- [HU14] Hu, X.; Chen, Z.; Yin, F. Impulsive noise cancellation for MIMO power line communications. *J. Commun.* 2014, 9, 241–247.
- [OH14] Oh, H.; Nam, H.; Park, S. Adaptive threshold blanker in an impulsive noise environment. *IEEE Trans. Electromagn. Compat.* 2014, 56, 1045–1052.
- [HAK18] Hakimi, S.; Hoddani, G.A. Generalized maximum correntropy detector for non-Gaussian environments. *Int. J. Adapt. Control Signal Process.* 2018, 32, 83–97.
- [KHA19] Khalil, A., Saadoui, S., Tabaa, M., Chehaitly, M., Monteiro, F., Oukaira, A., & Dandache, A. (2019). Combined Reed-Solomon and Convolutional codes for IWSN based on IDWPT/DWPT Architecture. *Procedia Computer Science*, 155, 666-671.
- [NEE00] Nee, Richard van, and Ramjee Prasad. "OFDM for wireless multimedia communications". Artech House, Inc., 2000.
- [NEG00] B. G. Negash and H. Nikookar, "Wavelet-based multicarrier transmission over multipath wireless channels," *Electronics Letters*, vol. 36, no.21, pp. 1787--1788, October 2000.
- [PIN18] Pinto-Benel FA, Blanco-Velasco M, Cruz-Roldán F. Throughput analysis of wavelet OFDM in broadband power line communications. *IEEE Access*. 2018 Jan 23;6:16727-36
- [KAN18] Khan AR, Gulhane SM. A highly sustainable multi-band orthogonal wavelet code division multiplexing UWB communication system for underground mine channel. *Digital Communications and Networks*. 2018 Nov 1;4(4):264-76.

- [CHE15] M. Chehaitly, M. Tabaa, F. Monteiro and A. Dandache. « A fast and configurable architecture for discrete wavelet packet transform ». Design of Circuits and Integrated Systems (DCIS), 2015 Conference on, P. 1-6, November 2015.
- [CHE16] M. Chehaitly, M. Tabaa, F. Monteiro and A. Dandache. « A VHDL-RTL implementation for a fast and configurable design of inverse discrete wavelet packet transform ». Design of Circuits and Integrated Systems (DCIS), 2016 Conference, 2016.
- [VIS96] M. Vishwanath and R. Owens. « A common architecture for the DWT and IDWT ». IEEE International Conference on Application Specific Systems, Architectures and Processors (ASAP), pp. 193–198.8, Aug. 1996.
- [MOT03] Motra, P. Bora and I. Chakrabarti. « An efficient hardware implementation of DWT and IDWT ». IEEE Conference on Convergent Technologies for the Asia-Pacific Region (TENCON), vol. 1, pp. 95–99, Oct 2003.
- [DEN94] T. Denk and K. Parhi. « Architectures for lattice structure based orthonormal discrete wavelet transforms ». IEEE International Conference on Application Specific Array Processors, pp. 259-270, Aug. 1994.
- [WU03] B-F. Wu and Y-Q. Hu. « An efficient VLSI implementation of the discrete wavelet transform using embedded instruction codes for symmetric filters ». IEEE Transactions on Circuits and Systems for Video Technology, vol. 13, no. 9, pp. 936–943, Sep. 2003.
- [JIN07] C. Jing and H.Y. Bin. « Efficient wavelet transform on FPGA using advanced distributed arithmetic ». 8 th IEEE International Conference on Electronic Measurement and Instruments (ICEMI'2007), pp. 2-512–2-515, Aug. 2007.
- [WU11] Z. Wu and W. Wang. « Pipelined architecture for FPGA implementation of lifting-based DWT ». 2011 International Conference on Electric Information and Control Engineering, pp. 1535–1538, Apr. 2011.
- [PAL06] R. Palero, R. Gironés and A. Cortes. « A novel FPGA architecture of a 2-D wavelet transform ». Journal of VLSI signal processing systems for signal, image and video technology, vol. 42, no. 3, pp. 273–284, 2006.
- [HU13] Y. Hu and C. Jong. « A memory-efficient high-throughput architecture for lifting-based multi-level 2-D DWT ». IEEE Transactions on Signal Processing, vol. 61, no. 20, pp. 4975–4987, Oct. 2013.
- [FAT03] O. Fatemi and S. Bolouki. « A Pipeline, Efficient and Programmable Architecture for the 1-D Discrete Wavelet Transform using Lifting Scheme ». The Second Conference On Machine Vision, Image Processing & Applications (MVIP 2003), Tehran 2003.
- [SOW16] K.B. Sowmya and J. Mathew. «Discrete Wavelet Transform Based on Coextensive Distributive Computation on FPGA». Materials Today: Proceedings, Second International Conference on Large Area Flexible Microelectronics (ILAFM 2016): Wearable Electronics, December 20th-22nd, 2016.
- [HAT01] H. Hatem, H. El-Matbouly, N. Hamdy and K. Shehata. « VLSI architecture of QMF for DWT integrated system ». 44th IEEE Midwest Symposium on Circuits and Systems (MWSCAS), vo. 2, pp. 560–563, 2001.
- [PAY03] G. Paya, M. M. Peiro, F. J. Ballester and V. Herrero. « A new inverse architecture discrete wavelet packet transform architecture ». IEEE, Signal Processing and Its Applications, 7803-7946, 443 - 446 vol.2, 2003.
- [ACH97] T. Acharya. « A Systolic Architecture for Discrete Wavelet Transforms ». IEEE, Digital Signal Processing Proceedings, 13th International Conference on Volume 2, 571 - 574 vol.2, 1997.
- [FAR06] M. Farahani and M. Eshghi. « Architecture of a Wavelet Packet Transform Using Parallel Filters ». TENCON 2006 - IEEE Region 10 Conference, 1-4244-0548-3, 1 – 4, 2006.
- [MAL99] S. Mallat. « A wavelet tour of signal processing ». Academic Press, 1999.
- [MAN09] A. Mansouri, A. Ahaitouf and F. Abdi. « An efficient VLSI architecture and FPGA implementation of highspeed and low power 2-D DWT for (9,7) wavelet filter ».. Int. J. Comput. Sci. Netw. Secur.9, 2009
- [WOR] The top 10 causes of death. World Health Organization (WHO). Accessed at: <https://www.who.int/news-room/fact-sheets/detail/the-top-10-causes-of-death>.
- [BEN17] Benjamin EJ, Blaha MJ, Chiuve SE, Cushman M, Das SR, Deo R, et al. Heart Disease and Stroke Statistics—2017 Update: A Report From the American Heart Association. *Circulation*. 2017;135:e1–e458. DOI: 10.1161/CIR.0000000000000485.

- [KAR194] K.Karboub, M.Tabaa, S.Dellagi, A.Dandache and F.Moutaouakkil, "Full training convolutional neural network for ECG signals classification" AIP conference Proceedings. Vol. 2123. No. 1. AIP Publishing 2019.
- [KAR193] K.Karboub, M.Tabaa, S.Dellagi, A.Dandache and F.Moutaouakkil, "Emergency patient's arrivals management based on IoT and Discrete Simulation using ARENA". Ubiquitous Networking: 5 the International Symposium, UNET 2019, Lemoges, France, November 20-22, 2019. Springer, 2019.
- [KAR192] Karboub, Tabaa, et al. "Intelligent Patient Monitoring for Arrhythmia and Congestive Failure Patients Using Internet of Things and Convolutional Neural Network." 2019 31th International Conference of Microelectronics. IEEE, 2019.
- [KAR191] K.Karboub, M.Tabaa, S.Dellagi, A.Dandache and F.Moutaouakkil, "Toward Health 4.0: Challenges and Opportunities." International Conference on Innovation and New Trends in Information Technology 2019, Tangier, Morocco. December 20-21, 2019.
- [LIA16] Li H, Liang H, Miao C, Cao L, Feng X, Tang C, Li E. Novel ECG signal classification based on KICA nonlinear feature extraction. *Circuits, Systems, and Signal Processing*. 2016 Apr 1;35(4):1187-97.
- [UBE09] Übeyli ED, Combining recurrent neural networks with eigenvector methods for classification of ECG beats, *Digital Signal Process* 19(2):320–329, 2009.
- [UBE08] Übeyli ED, Usage of eigenvector methods in implementation of automated diagnostic systems for ECG beats, *Digital Signal Process* 18(1):33–48, 2008.
- [LI16] Li, T., & Zhou, M. (2016). ECG Classification Using Wavelet Packet Entropy and Random Forests. *Entropy*, 18(8), 285. doi:10.3390/e18080285.
- [MIS10] Mishra AK, Raghav S, Local fractal dimension based ECG arrhythmia classification, *Biomed Signal Process Control* 5(2):114–123, 2010.
- [KHO10] Khorrami, H., & Moavenian, M. (2010). A comparative study of DWT, CWT and DCT transformations in ECG arrhythmias classification.
- [YIL10] Yılmaz, B., Asyalı, M. H., Arıkan, E., Yetkin, S., & Özgen, F. (2010). Sleep stage and obstructive apneic epoch classification using single-lead ECG. *BioMedical Engineering OnLine*, 9(1), 39. doi:10.1186/1475-925x-9-39.
- [QIB05] Qibin Zhao, & Liqing Zhang. (n.d.). ECG Feature Extraction and Classification Using Wavelet Transform and Support Vector Machines. 2005 International Conference on Neural Networks and Brain. doi:10.1109/icnnb.2005.1614807.
- [DES15] Desai, U., Martis, R. J., Nayak, C. G., Sarika K., & Seshikala, G. (2015). Machine intelligent diagnosis of ECG for arrhythmia classification using DWT, ICA and SVM techniques. 2015 Annual IEEE India Conference (INDICON). doi:10.1109/indicon.2015.7443220.
- [DAS13] Das, M. K., & Ari, S. (2013). ECG arrhythmia recognition using artificial neural network with S-transform based effective features. 2013 Annual IEEE India Conference (INDICON). doi:10.1109/indcon.2013.6726153.
- [KHA13] Khalighi, S., Sousa, T., Pires, G., & Nunes, U. (2013). Automatic sleep staging: A computer assisted approach for optimal combination of features and polysomnographic channels. *Expert Systems with Applications*, 40(17), 7046–7059. doi:10.1016/j.eswa.2013.06.023.
- [GAR98] C. Garcia, G. Zikos, and G. Tziritas, "A wavelet-based framework for face recognition," in *Workshop on Advances in Facial Image Analysis and Recognition Technology*, 5 th European Conference on Computer Vision, pp. 84–92, Publications, (1998).
- [LIU07] C. C. LIU, D. Q. Dai, and H. Yan, "Local Discriminant Wavelet Packet Coordinates for Face Recognition," *Journal of Machine learning Research*, pp. 1165–1195, May (2007).
- [MOO01] Moody GB, Mark RG. The impact of the MIT-BIH Arrhythmia Database. *IEEE Eng in Med and Biol* 20(3):45-50 (May-June 2001). (PMID: 11446209)
- [GOL03] Goldberger AL, Amaral LAN, Glass L, Hausdorff JM, Ivanov PCh, Mark RG, Mietus JE, Moody GB, Peng C-K, Stanley HE. PhysioBank, PhysioToolkit, and PhysioNet: Components of a New Research Resource for Complex Physiologic Signals (2003). *Circulation*. 101(23):e215-e220.

- [BAIM86] Baim DS, Colucci WS, Monrad ES, Smith HS, Wright RF, Lanoue A, Gauthier DF, Ransil BJ, Grossman W, Braunwald E. Survival of patients with severe congestive heart failure treated with oral milrinone. *J American College of Cardiology* 1986 Mar; 7(3):661-670.
- [POU13] Pongpongsri, S., & Yu, X.-H. (2013). An adaptive filtering approach for electrocardiogram (ECG) signal noise reduction using neural networks. *Neurocomputing*, 117, 206–213. doi:10.1016/j.neucom.2013.02.010.
- [ELH16] Elhaj, F. A., Salim, N., Harris, A. R., Swee, T. T., & Ahmed, T. (2016). Arrhythmia recognition and classification using combined linear and nonlinear features of ECG signals. *Computer Methods and Programs in Biomedicine*, 127, 52–63. doi:10.1016/j.cmpb.2015.12.024.
- [ABD19] Abdalla, F. Y. O., Wu, L., Ullah, H., Ren, G., Noor, A., & Zhao, Y. (2019). ECG arrhythmia classification using artificial intelligence and nonlinear and nonstationary decomposition. *Signal, Image and Video Processing*. Doi:10.1007/s11760-019-01479-4.
- [AIT17] Ait-Sahalia, Y., & Xiu, D. (2017). Principal Component Analysis of High-Frequency Data. *Journal of the American Statistical Association*, 1–17. doi:10.1080/01621459.2017.1401542.
- [GE19] Ge, Z., Zhu, Z., Feng, P., Zhang, S., Wang, J., & Zhou, B. (2019). ECG-Signal Classification Using SVM with Multi-feature. 2019 8th International Symposium on Next Generation Electronics (ISNE). doi:10.1109/isne.2019.8896430.
- [SCH15] J. Schmidhuber, “Deep Learning in neural networks: an overview,” *Neural Netw.*, vol. 61, pp. 85–117, 2015.
- [DUD01] Duda RO, Hart PE, Stork DG: *Pattern Classification* New York, John Wiley 2001.
- [SAI13] Saini, I., Singh, D., & Khosla, A. (2013). QRS detection using K-Nearest Neighbor algorithm (KNN) and evaluation on standard ECG databases. *Journal of Advanced Research*, 4(4), 331–344. doi:10.1016/j.jare.2012.05.007.
- [JIA07] Jiang, L., Wang, D., Cai, Z., & Yan, X. (2007). Survey of Improving Naive Bayes for Classification. *Lecture Notes in Computer Science*, 134–145. doi:10.1007/978-3-540-73871-8_14.
- [GRO96] Grove, W. M., & Meehl, P. E. (1996). Comparative efficiency of informal (subjective, impressionistic) and formal (mechanical, algorithmic) prediction procedures: The clinical-statistical controversy. *Psychology, Public Policy, and Law*, 2(2), 293–323. doi:10.1037/1076-8971.2.2.293
- [PRE09] Prel, J.-B. du, Hommel, G., Röhrig, B., & Blettner, M. (2009). Confidence Interval or P-Value? Part 4 of a Series on Evaluation of Scientific Publications. *Deutsches Aerzteblatt Online*. doi:10.3238/arztebl.2009.0335.
- [ACQ19] Acquisition and Analysis of an ECG (electrocardiography) Signal | Protocol. ACCESSED: 2019-12-30.
- [SIN95] Singh, S. N., Fletcher, R. D., Fisher, S. G., Singh, B. N., Lewis, H. D., Deedwania, P. C., ... Lazzari, D. (1995). Amiodarone in Patients with Congestive Heart Failure and Asymptomatic Ventricular Arrhythmia. *New England Journal of Medicine*, 333(2), 77–82. doi:10.1056/nejm199507133330201.
- [QUE18] Queiroz, J. A., Junior, A., Lucena, F., & Barros, A. K. (2018). Diagnostic decision support systems for atrial fibrillation based on a novel electrocardiogram approach. *Journal of Electrocardiology*, 51(2), 252–259. doi:10.1016/j.jelectrocard.2017.10.014.
- [XU18] Xu, S. S., Mak, M.-W., & Cheung, C.-C. (2018). Towards End-to-End ECG Classification with Raw Signal Extraction and Deep Neural Networks. *IEEE Journal of Biomedical and Health Informatics*, 1–1. doi:10.1109/jbhi.2018.2871510.
- [SAN18] Sannino, G., & De Pietro, G. (2018). A deep learning approach for ECG-based heartbeat classification for arrhythmia detection. *Future Generation Computer Systems*, 86, 446–455. doi:10.1016/j.future.2018.03.057
- [YIL18] Yıldırım, Ö., Pławiak, P., Tan, R.-S., & Acharya, U. R. (2018). Arrhythmia detection using deep convolutional neural network with long duration ECG signals. *Computers in Biology and Medicine*. doi:10.1016/j.combiomed.2018.09.009.
- [TUN19] Tuncer, T., Dogan, S., Pławiak, P., & Rajendra Acharya, U. (2019). Automated arrhythmia detection using novel hexadecimal local pattern and multilevel wavelet transform with ECG signals. *Knowledge-Based Systems*, 104923. doi:10.1016/j.knosys.2019.104923.
- [CEL18] Celin, S., Vasanth, K. (2018). Detection and Classification of R-Peak Using Naïve Bayes Classifier. *International journal of engineering and technology*. 7 (3.27) (2018) 397-403.

- [VIS18] Vishwanath, B., Pujeri, R. V., & Devanagavi, G. (2019). Probabilistic principal component analysis-based dimensionality reduction and optimization for arrhythmia classification using ECG signals. *Bio-Algorithms and Med-Systems*, 0(0). doi:10.1515/bams-2018-0037.
- [RAI18] Rai, H. M., & Chatterjee, K. (2018). A unique feature extraction using MRDWT for automatic classification of abnormal heartbeat from ECG big data with Multilayered Probabilistic Neural Network classifier. *Applied Soft Computing*. doi:10.1016/j.asoc.2018.04.005.
- [ALI14] Alickovic, E., & Subasi, A. (2014). Effect of Multiscale PCA De-noising in ECG Beat Classification for Diagnosis of Cardiovascular Diseases. *Circuits, Systems, and Signal Processing*, 34(2), 513–533. doi:10.1007/s00034-014-9864-8.
- [YEH10] Yeh, Y.-C., Wang, W.-J., & Chiou, C. W. (2010). A novel fuzzy c-means method for classifying heartbeat cases from ECG signals. *Measurement*, 43(10), 1542–1555. doi:10.1016/j.measurement.2010.08.019.
- [PAT15] Patidar, S., Pachori, R. B., & Rajendra Acharya, U. (2015). Automated diagnosis of coronary artery disease using tunable-Q wavelet transform applied on heart rate signals. *Knowledge-Based Systems*, 82, 10. doi:10.1016/j.knosys.2015.02.011.
- [DAV17] Davari Dolatabadi, A., Khadem, S. E. Z., & Asl, B. M. (2017). Automated diagnosis of coronary artery disease (CAD) patients using optimized SVM. *Computer Methods and Programs in Biomedicine*, 138, 117–126. doi:10.1016/j.cmpb.2016.10.011.
- [SUD17] Sudarshan VK et al (2017) Automated diagnosis of congestive heart failure using dual tree complex wavelet transform and statistical features extracted from 2 s of ECG signals. *Comput Biol Med* 83(January):48–58.
- [OH18] Oh, S. L., Ng, E. Y. K., Tan, R. S., & Acharya, U. R. (2018). Automated diagnosis of arrhythmia using combination of CNN and LSTM techniques with variable length heart beats. *Computers in Biology and Medicine*. doi:10.1016/j.compbiomed.2018.06.002
- [FEN19] A.Fentis, L.Bahatti, M.Tabaa, M.Mestari « *Short-term nonlinear autoregressive photovoltaic power forecasting using statistical learning approaches and in-situ observations* ». *International Journal of Energy and Environmental Engineering*, Springer 10(2):189-206, June 2019 (<https://doi.org/10.1007/s40095-018-0293-5>).
- [FEN18] A.Fentis, H.Bahatti, M.Tabaa, M.Mestari « *Simple model for short- term photovoltaic power forecasting using statistical learning approach* », 3rd IEEE International Conference on Renewable Energies, Power Systems and Green Inclusive Economy, REPS & GIE-2018, Casablanca, Morocco, April 23-24, 2018 (<https://doi.org/10.1109/REPSGIE.2018.8488839>).
- [FEN171] A.Fentis, L.Bahatti, M.Tabaa, B.Chouri, M.Mestari « *Data driven Model for Short Term PV Power Forecasting using Least Square Support Vector Regression* » 5th IEEE International Renewable and Sustainable Energy Conference (IRSEC), Tangier, Morocco, 4-7 December 2017 (<https://doi.org/10.1109/IRSEC.2017.8477401>).
- [FEN171] A.Fentis, L.Bahatti, M.Mestari, M.Tabaa, B.Chouri « *Simple modèle pour prévision de la puissance photovoltaïque à court terme* » Conférence internationale sut les énergies renouvelables et l’efficacité énergétique, Fès, Morocco, 8-9 November, 2017.
- [ZHA15] Zhang, Y., Beaudin, M., Taheri, R., Zareipour, H., Wood, D.: Dayahead power output forecasting for small-scale solar photovoltaic electricity generators. *IEEE Trans. Smart Grid* 6(5), 2253–2262 (2015)
- [HUA10] Huang, Y., Lu, J., Liu, C., Xu, X., Wang, W., Zhou, X.: Comparative study of power forecasting methods for pv stations. In: *Power System Technology (POWERCON)*, 2010 International Conference on, 1–6. IEEE, (2010)
- [BAC09] Bacher, P., Madsen, H., Nielsen, H.A.: Online short-term solar power forecasting. *Solar Energy* 83(10), 1772–1783 (2009)
- [RAM15] Ramsami, P., Oree, V.: A hybrid method for forecasting the energy output of photovoltaic systems. *Energy Convers Manag.* 95, 406– 413 (2015)
- [MEL14] Mellit, A., Pavan, A.M., Lughi, V.: Short-term forecasting of power production in a large-scale photovoltaic plant. *Solar Energy* 105, 401–413 (2014)
- [SHI12] Shi, J., Lee, W.-J., Liu, Y., Yang, Y., Wang, P.: Forecasting power output of photovoltaic systems based on weather classification and support vector machines. *IEEE Transa. Ind. Appl.* 48(3), 1064–1069 (2012)

- [SIL12] Silva Fonseca, J .G., Oozeki, T., Takashima, T., Koshimizu, G., Uchida, Y., Ogimoto, K.: Use of support vector regression and numerically predicted cloudiness to forecast power output of a photovoltaic power plant in kitakyushu, japan. *Prog. Photovolt. Res. Appl.* **20**(7), 874–882 (2012).
- [LEO15] De Leone, R., Pietrini, M., Giovannelli, A.: Photovoltaic energy production forecast using support vector regression. *Neural Comput. Appl.* **26**(8), 1955–1962 (2015).
- [TAO10] Tao, C., Shanxu, D., Changsong, C.: Forecasting power output for grid-connected photovoltaic power system without using solar radiation measurement. In: *Power Electronics for Distributed Generation Systems (PEDG), 2010 2nd IEEE International Symposium on*, 773–777. IEEE, (2010)
- [CHE11] Chen, C., Duan, S., Cai, T., Liu, B.: Online 24-h solar power forecasting based on weather type classification using artificial neural network. *Solar Energy* **85**(11), 2856–2870 (2011)
- [YAN14] Yang, H.-T., Huang, C.-M., Huang, Y.-C., Pai, Y.-S.: A weatherbased hybrid method for 1-day ahead hourly forecasting of pv power output. *IEEE Trans. Sustain. Energy* **5**(3), 917–926 (2014)
- [MAN12] Mandal, P., Madhira, S.T.S., Meng, J., Pineda, R.L., et al.: Forecasting power output of solar photovoltaic system using wavelet transform and artificial intelligence techniques. *Procedia Comput. Sci.* **12**, 332–337 (2012).
- [PEL13] Pelland, S., Remund, J., Kleissl, J., Oozeki, T., De Brabandere, K.: Photovoltaic and solar forecasting: state of the art. *IEA PVPS Task* **14**, 1–36 (2013).
- [SIL12] Silva Fonseca, J .G., Oozeki, T., Takashima, T., Koshimizu, G., Uchida, Y., Ogimoto, K.: Use of support vector regression and numerically predicted cloudiness to forecast power output of a photovoltaic power plant in kitakyushu, japan. *Prog. Photovolt. Res. Appl.* **20**(7), 874–882 (2012).
- [LIU15] Liu, J., Fang, W., Zhang, X., Yang, C.: An improved photovoltaic power forecasting model with the assistance of aerosol index data. *IEEE Trans. Sustain. Energy* **6**(2), 434–442 (2015).
- [LEO15] De Leone, R., Pietrini, M., Giovannelli, A.: Photovoltaic energy production forecast using support vector regression. *Neural Comput. Appl.* **26**(8), 1955–1962 (2015)
- [CHU11] Chupong, C., Plangklang, B.: Forecasting power output of pv grid connected system in thailand without using solar radiation measurement. *Energy Procedia* **9**, 230–237 (2011)
- [CHE11] Chen, C., Duan, S., Cai, T., Liu, B.: Online 24-h solar power forecasting based on weather type classification using artificial neural network. *Solar Energy* **85**(11), 2856–2870 (2011)
- [DIN11] Ding, M., Wang, L., Bi, R.: An ann-based approach for forecasting the power output of photovoltaic system. *Procedia Environ. Sci.* **11**, 1308–1315 (2011)
- [SUY99] Suykens, J.A., Vandewalle, J.: Least squares support vector machine classifiers. *Neural Process. Lett.* **9**(3), 293–300 (1999)
- [HOR91] Hornik, K.: Approximation capabilities of multilayer feedforward networks. *Neural Netw.* **4**(2), 251–257 (1991)
- [OGU14] Ogunsola, O.T., Song, L.: Restoration of long-term missing gaps in solar radiation. *Energy Build.* **82**, 580–591 (2014)
- [BRO16] Brooks, M.J., von Backström, T.W., van Dyk, E.E.: Performance characteristics of a perforated shadow band in the presence of cloud. *Solar Energy* **139**, 533–546 (2016)
- [CHA20] A.Chakir, M.Tabaa, F.Moutaouakkil, H.Medromi, M.Julien, A.Dandache, K.Alami « Optimal Energy management for a grid connected PV-battery system ». *Energy Reports Journal, Elsevier* -In Press- IF : 3.83 , Indexed JCR. (<https://doi.org/10.1016/j.egyr.2019.10.040>).
- [CHA191] A.Chakir, M.Tabaa, F.Moutaouakkil, H.Medromi, K.Alami « A Combined Source and Demand-Side Energy Management System for a Grid-Connected PV-Wind Hybrid System » M. Ben Ahmed et al. (Eds.): SCA 2019, LNITI, pp. 1–15, 2020 (DOI:10.1007/978-3-030-37629-1_51).
- [CHA192] A.Chakir, M.Tabaa, F.Moutaouakkil, H.Medromi, K.Alami «Optimal control design for a grid connected PV-wind-battery hybrid system feeding residential loads» In Proceedings of the 4th ACM-International Conference on Smart City Applications (p. 63), October, 2019.

- [CHA181] A.Chakir, M.Tabaa, F.Moutaouakil, H.Medromi, K.Alami «Comparative study of MPPT methods for PV systems: Case of Moroccan house» 30th IEEE International Conference on Microelectronics, ICM 2018, Sousse, Tunisia, December 16-19, 2018 (<https://doi.org/10.1109/ICM.2018.8704035>).
- [CHA182] A.Chakir, M.Tabaa, F.Moutaouakkil, H.Medromi, K.Alami «Vers un réseau électrique intelligent basé sur l'internet des énergies» 7th International Conference on Innovation and New Trends in Information Systems, INTIS'2018, Marrakech, Maroc, 21-22 December 2018.
- [ZHA16] X. Q. Zhang, "The trends, promises and challenges of urbanisation in the world," *Habitat Int.*, 2016.
- [MAD11] R. Madlener and Y. Sunak, "Impacts of urbanization on urban structures and energy demand: What can we learn for urban energy planning and urbanization management?," *Sustain. Cities Soc.*, 2011.
- [CAM19] A. Camero and E. Alba, "Smart City and information technology: A review," *Cities*, 2019.
- [GIR17] P. Girardi and A. Temporelli, "Smartainability: A Methodology for Assessing the Sustainability of the Smart City," in *Energy Procedia*, 2017.
- [ZHO16] K. Zhou, S. Yang, and Z. Shao, "Energy Internet: The business perspective," *Applied Energy*. 2016.
- [ADE19] T. Adefarati and R. C. Bansal, "Energizing Renewable Energy Systems and Distribution Generation," in *Pathways to a Smarter Power System*, Elsevier, 2019, pp. 29–65.
- [KAR19] J. Kartite and M. Cherkaoui, "Study of the different structures of hybrid systems in renewable energies: A review," in *Energy Procedia*, 2019, vol. 157, pp. 323–330.
- [KHA18] F. A. Khan, N. Pal, and S. H. Saeed, "Review of solar photovoltaic and wind hybrid energy systems for sizing strategies optimization techniques and cost analysis methodologies," *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. 2018.
- [LIA19] J. Lian, Y. Zhang, C. Ma, Y. Yang, and E. Chaima, "A review on recent sizing methodologies of hybrid renewable energy systems," *Energy Conversion and Management*, vol. 199. Elsevier Ltd, 01-Nov-2019.
- [KUM16] D. Kumar and K. Chatterjee, "A review of conventional and advanced MPPT algorithms for wind energy systems," *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 55. Elsevier Ltd, pp. 957–970, 01-Mar-2016.
- [CHA191] A. Chakir, M. Tabaa, F. Moutaouakkil, H. Medromi, and K. Alami, "Comparative study of MPPT methods for PV systems : Case of Moroccan house," in *Proceedings of the International Conference on Microelectronics, ICM*, 2019.
- [MOT19] S. Motahhir, A. El Hammoumi, and A. El Ghzizal, "The Most Used MPPT Algorithms: Review and the Suitable Low-cost Embedded Board for Each Algorithm," *J. Clean. Prod.*, p. 118983, 2019.
- [OLA16] L. Olatomiwa, S. Mekhilef, M. S. Ismail, and M. Moghavvemi, "Energy management strategies in hybrid renewable energy systems: A review," *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. 2016.
- [SHA18] H. Shareef, M. S. Ahmed, A. Mohamed, and E. Al Hassan, "Review on Home Energy Management System Considering Demand Responses, Smart Technologies, and Intelligent Controllers," *IEEE Access*, vol. 6, pp. 24498–24509, Apr. 2018.
- [ALA19] M. S. Alam and S. A. Arefifar, "Energy Management in Power Distribution Systems: Review, Classification, Limitations and Challenges," *IEEE Access*, vol. 7, pp. 92979–93001, 2019.
- [HAN18] M. A. Hannan *et al.*, "A review of internet of energy based building energy management systems: Issues and recommendations," *IEEE Access*, vol. 6, pp. 38997–39014, Jul. 2018.
- [CHA201] A. Chakir *et al.*, "Optimal energy management for a grid connected PV-battery system," *Energy Reports*, vol. 6, 2020.
- [CHA192] A. Chakir, M. Tabaa, F. Moutaouakkil, H. Medromi, and K. Alami, "Optimal control design for a grid connected PV-Wind-Battery hybrid system feeding residential loads," in *ACM International Conference Proceeding Series*, 2019, pp. 1–7.
- [CHA202] A. Chakir, M. Tabaa, F. Moutaouakkil, H. Medromi, and K. Alami, "A Combined Source and Demand-Side Energy Management System for a Grid-Connected PV-Wind Hybrid System," Springer, Cham, 2020, pp. 707–721.
- [LUN17] A. C. Luna, N. L. Diaz, M. Graells, J. C. Vasquez, and J. M. Guerrero, "Mixed-integer-linear-programming-based energy management system for hybrid PV-wind-battery microgrids: Modeling, design, and experimental verification," *IEEE Trans. Power Electron.*, vol. 32, no. 4, pp. 2769–2783, Apr. 2017.

- [KUM15] S. Kumaravel and S. Ashok, "Optimal power management controller for a stand-alone solar PV/Wind/Battery hybrid energy system," *Energy Sources, Part A Recover. Util. Environ. Eff.*, vol. 37, no. 4, pp. 407–415, Feb. 2015.
- [AKT18] A. Aktas, K. Erhan, S. Özdemir, and E. Özdemir, "Dynamic energy management for photovoltaic power system including hybrid energy storage in smart grid applications," *Energy*, vol. 162, pp. 72–82, Nov. 2018.
- [XU18] Y. Xu and X. Shen, "Optimal Control Based Energy Management of Multiple Energy Storage Systems in a Microgrid," *IEEE Access*, vol. 6, pp. 32925–32934, Jun. 2018.
- [NIK15] N. Nikmehr and S. Najafi-Ravadanegh, "Optimal operation of distributed generations in micro-grids under uncertainties in load and renewable power generation using heuristic algorithm," *IET Renew. Power Gener.*, vol. 9, no. 8, pp. 982–990, Nov. 2015.
- [SAR19] T. Sarkar, A. Bhattacharjee, H. Samanta, K. Bhattacharya, and H. Saha, "Optimal design and implementation of solar PV-wind-biogas-VRFB storage integrated smart hybrid microgrid for ensuring zero loss of power supply probability," *Energy Convers. Manag.*, vol. 191, pp. 102–118, Jul. 2019.
- [KHA19] Y. Khawaja, A. Allahham, D. Giaouris, C. Patsios, S. Walker, and I. Qiqieh, "An integrated framework for sizing and energy management of hybrid energy systems using finite automata," *Appl. Energy*, vol. 250, pp. 257–272, Sep. 2019.
- [LIU19] J. Liu, X. Chen, H. Yang, and Y. Li, "Energy storage and management system design optimization for a photovoltaic integrated low-energy building," *Energy*, p. 116424, Oct. 2019.
- [KAD19] A. Kadri, H. Marzougui, A. Aouiti, and F. Bacha, "Energy management and control strategy for a DFIG wind turbine/fuel cell hybrid system with super capacitor storage system," *Energy*, p. 116518, 2019.
- [NOG19] E. Noghreian and H. R. Koofgar, "Power control of hybrid energy systems with renewable sources (wind-photovoltaic) using switched systems strategy," *Sustain. Energy, Grids Networks*, Nov. 2019.
- [HAK19] S. M. Hakimi and A. Hasankhani, "Intelligent energy management in off-grid smart buildings with energy interaction," *J. Clean. Prod.*, Jan. 2019.
- [KHA16] V. Khare, S. Nema, and P. Baredar, "Solar-wind hybrid renewable energy system: A review," *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. 2016.
- [ZHA18] L. Zhao, W. Wang, L. Zhu, Y. Liu, and A. Dubios, "Economic analysis of solar energy development in North Africa," *Glob. Energy Interconnect.*, 2018.
- [TAM16] V. Tamrakar, S. C. Gupta, and Y. Sawle, "Study of characteristics of single and double diode electrical equivalent circuit models of solar PV module," in *International Conference on Energy Systems and Applications, ICESA 2015*, 2016, pp. 312–317.
- [ALR13] N. M. A. Alrahim Shannan, N. Z. Yahaya, and B. Singh, "Single-diode model and two-diode model of PV modules: A comparison," in *Proceedings - 2013 IEEE International Conference on Control System, Computing and Engineering, ICCSCE 2013*, 2013, pp. 210–214.
- [JAM17] P. A. B. James and A. B. S. Bahaj, "Small-Scale Wind Turbines," in *Wind Energy Engineering: A Handbook for Onshore and Offshore Wind Turbines*, Elsevier Inc., 2017, pp. 389–418.
- [XIA13] Y. Xia, K. H. Ahmed, and B. W. Williams, "Wind turbine power coefficient analysis of a new maximum power point tracking technique," *IEEE Trans. Ind. Electron.*, vol. 60, no. 3, pp. 1122–1132, 2013.
- [GHO15] N. El Ghossein, J. P. Salameh, N. Karami, M. El Hassan, and M. B. Najjar, "Survey on electrical modeling methods applied on different battery types," in *2015 3rd International Conference on Technological Advances in Electrical, Electronics and Computer Engineering, TAECE 2015*, 2015, pp. 39–44.
- [PUT15] W. S. Putra, B. R. Dewangga, A. Cahyadi, and O. Wahyunggoro, "Current estimation using Thevenin battery model," in *Proceedings - Joint International Conference on Electric Vehicular Technology and Industrial, Mechanical, Electrical and Chemical Engineering, ICEVT 2015 and IMECE 2015*, 2016, pp. 5–9.
- [AZE18] M. AZEROUAL, A. EL MAKRINI, H. EL MOUSSAOUI, and H. EL MARKHI, "Renewable Energy Potential and Available Capacity for Wind and Solar Power in Morocco Towards 2030," *J. Eng. Sci. Technol. Rev.*, vol. 11, no. 1, pp. 189–198, Feb. 2018.
- [IEA19] "Data & Statistics - IEA." [Online]. Available: <https://www.iea.org/data-and-statistics?country=MOROCCO&fuel=Energy%20consumption&indicator=Electricity%20consumption> [Accessed: 26-Dec-2019].

- [EVO20] "Evolution de la taille moyenne des ménages par milieu de résidence : 1960-2050." [Online]. Available: https://www.hcp.ma/Evolution-de-la-taille-moyenne-des-menages-par-milieu-de-residence-1960-2050_a708.html. [Accessed: 08-May-2020].
- [CHE202] B.Chegar, M.Tabaa, F.Moutaouakkil, E.Simeu, H.Medromi « *Contribution of thermos-physical parameters of thermal insulation and renewable energies to the energy performance of a building in different climates regions of Morocco* ». Journal of Building Engineering, Elsevier – In Press – IF : 2.37, Indexed JCR (<https://doi.org/10.1016/j.jobe.2019.101164>).
- [CHE201] B.Chegar, M.Tabaa, F.Moutaouakkil, E.Simeu, H.Medromi « *Shading Devices Benefits on Thermal Comfort and Energy Performance of a Residential Building in Different Climates in Morocco* » M. Ben Ahmed et al. (Eds.); SCA 2019, LNITI, pp. 1–18, 2020 (https://doi.org/10.1007/978-3-030-37629-1_79).
- [CHE192] B.Chegar, M.Tabaa, F.Moutaouakkil, E.Simeu, H.Medromi « *Energy savings and thermal comfort benefits of shading devices: case study of a typical moroccan building* » In Proceedings of the 4th ACM-International Conference on Smart City Applications (p. 63), October, 2019.
- [CHE191] B.Chegar, M.Tabaa, F.Moutaouakkil, E.Simeu, H.Medroumi « *The impact of the thermos-physical parameters of insulation on the energy performance of a building in Morocco* » In IEEE International Conference of Computer Science and Renewable Energies (ICCSRE) (pp. 1-6), July 2019 (DOI: [10.1109/ICCSRE.2019.8807480](https://doi.org/10.1109/ICCSRE.2019.8807480)).
- [AME19] "AMEE, Cadre réglementaire." [Online]. Available: http://www.amee.ma/index.php?option=com_content&view=article&id=482&Itemid=865&lang=fr. [Accessed: 08-Jun-2019].
- [SEC16] "Secrétariat d'Etat chargé du Tourisme, Programme Azur 2020." [Online]. Available: <https://www.tourisme.gov.ma/fr/vision-2020/produits-touristiques/azur-2020>. [Accessed: 13-Feb-2019].
- [ALA] A. L. ALAMI, *Perspective énergétique du Maroc : Enjeux et défis*.
- [SGH18] H. Sghiouri, A. Mezhab, M. Karkri, and H. Naji, "Shading devices optimization to enhance thermal comfort and energy performance of a residential building in Morocco," *J. Build. Eng.*, vol. 18, no. October 2017, pp. 292–302, Jul. 2018.
- [JIH18] A. S. Jihad and M. Tahiri, "Forecasting the heating and cooling load of residential buildings by using a learning algorithm 'gradient descent', Morocco," *Case Stud. Therm. Eng.*, vol. 12, no. February, pp. 85–93, 2018.
- [ROM15] Z. Romani, A. Draoui, and F. Allard, "Metamodeling the heating and cooling energy needs and simultaneous building envelope optimization for low energy building design in Morocco," *Energy Build.*, vol. 102, pp. 139–148, 2015.
- [SGH19] H. Sghiouri, M. Charai, A. Mezhab, and M. Karkri, "Comparison of passive cooling techniques in reducing overheating of clay-straw building in semi-arid climate," *Build. Simul.*, no. August, pp. 0–47, 2019.
- [ZHA17] L. Zhang, T. Luo, X. Meng, Y. Wang, C. Hou, and E. Long, "Effect of the thermal insulation layer location on wall dynamic thermal response rate under the air-conditioning intermittent operation," *Case Stud. Therm. Eng.*, vol. 10, no. 288, pp. 79–85, 2017.
- [KHE12] H. Khelifa, D. Belkacem, H. Omar, and I. Omar, "ème Séminaire International sur les Energies Nouvelles et Modélisation de l' Effet Ener gétique de l' Enveloppe d' un Bâtiment sur l' Ambiance Intér ieur e," vol. 36000, no. 1, pp. 1–5, 2012.
- [BEN19] S. Bendara *et al.*, "Energy Efficiency and Insulation Thickness According to the Compactness Index Case of a Studio Apartment Under Saharan Weather Conditions," *J. Sol. Energy Eng.*, vol. 141, no. 4, p. 041011, 2019.
- [LAP18] R. Lapisa, E. Bozonnet, P. Salagnac, and M. O. Abadie, "Optimized design of low-rise commercial buildings under various climates – Energy performance and passive cooling strategies," *Build. Environ.*, vol. 132, no. January, pp. 83–95, 2018.
- [KLE10] S.A KLEIN *et al.*, *TRNSYS: A Transient System Simulation Program. In : . Madison, USA : Solar Energy Laboratory, University of Wisconsin. 2010 - CSTB. 2010.*
- [KLE07] S.A KLEIN *et al.*, *Multizone Building modeling with Type56 and TRNBuild - CSTB*, vol. 6. 2007.
- [CST19] "Centre Scientifique et Technique du Bâtiment - CSTB." [Online]. Available: <http://www.cstb.fr/fr/>. [Accessed: 31-May-2019].
- [AME14] AMEE, *Règlement thermique de construction au Maroc (RTCM)*, vol. 91. 2014.

[INT06] ISO13786, “International Standard - ISO : 13786 Thermal Performance of building components - Dynamic thermal characteristics - Calculation methods,” 61010-1 © Iec2001, p. 13, 2006.

[ENR06] ISO13790, “Energy performance of buildings—Calculation of energy use for space heating and cooling,” *Eur. Comm. Stand. (CEN)*, Brussels, vol. 1, no. 1, p. 140, 2006.