

## FACULTE DES SCIENCES

### THESE

Présentée par :

**Koffi Agbeblewu DOTCHE**

pour obtenir le grade de :

**Doctorat Unique en Sciences de l'Ingénieur**

Spécialité : **Génie Electrique**

**APPROCHES D'OPTIMISATION A PRIORI DE LA  
CONSOMMATION ENERGETIQUE DES SYSTEMES DE  
TELECOMMUNICATIONS ET INTEGRATION DES ENERGIES  
RENOUVELABLES AU SERVICE D'ACCES UNIVERSEL**

Soutenue le 07 octobre 2020 devant le jury composé de :

- Président** : **Professeur Magolmèèna BANNA**, Université de Lomé, Togo
- Rapporteurs** : **M. André FAYE**, Maître de Conférences, Université Gaston Berger de Saint Louis, Sénégal  
: **M. Mazabalo BANETO**, Maître de Conférences, Université de Lomé, Togo
- Examineur** : **M. Koffi Mawugno KODJO**, Maître de Conférences, Université de Lomé, Togo
- Directeur de thèse** : **M. Adekunlé Akim SALAMI**, Maître de Conférences, Université de Lomé, Togo.

**Octobre, 2020**

## Dédicace

A  
*ma famille...*

## Remerciements

Il est bon en tout de remercier le Seigneur **YHWH**, de louer le Saint du Très Haut **Adonai**, et si l'Eternel **El-Shadaï** ne bâtit pas la cité, ceux qui travaillent, font de vains efforts (Ps : 92.1;127.1.).

Mes sincères remerciements vont :

- ❖ au Docteur **SALAMI Adekunlé Akim**, Maître de Conférences, Ingénieur Génie Electrique, Directeur-Adjoint de l'Ecole Nationale Supérieure d'Ingénieurs (ENSI), Directeur de ce mémoire de thèse, qui a accepté de diriger ce travail, et pour sa disponibilité ;
- ❖ ma gratitude va aussi à l'endroit du président du jury, le Professeur Titulaire **BANNA Magolmèèna**, Directeur de la DAAS, Université de Lomé, TOGO. Merci d'avoir accepté de présider ce jury.
- ❖ J'aimerais aussi exprimer mes sincères remerciements aux professeurs, Docteur **FAYE André**, Maître de conférences (à l'Université Gaston Berger de Saint Louis, UGSL, Sénégal) ; et Docteur **BANETO Mazabalo Paul**, Maître de conférences (Université de Lomé, TOGO) pour avoir accepté de rapporter cette thèse. Merci de l'intérêt que vous avez porté au travail.
- ❖ au Président et membres du jury pour leurs contributions pertinentes à l'amélioration de ce travail, et pour avoir accepté de prendre part à ce jury ;
- ❖ au Directeur de l'Ecole Nationale Supérieure d'Ingénieurs (ENSI), le Professeur Titulaire **AJAVON Ayité Sénah Akoda**, Ingénieur Electro-Energéticien, qui a dirigé mes premiers pas dans les sciences de l'ingénieur ;
- ❖ au Professeur Titulaire **BEDJA Koffi-Sa**, Ingénieur des Télécommunications ; Responsable de la Formation Doctorale en Sciences de l'Ingénieur, et du Laboratoire de Recherches en Sciences de l'Ingénieur (LARSI), au sein duquel cette thèse fut élaborée,
- ❖ au Chef du département Génie Electrique à l'ENSI, Docteur **KODJO Koffi Mawugno**, Maître de Conférences, pour la revue du manuscrit, d'avoir accepté d'être un membre du jury comme examinateur ;
- ❖ au Docteur **AGBOSSOU Komi Akpé**, Maître Assistant et Enseignant-Chercheur à l'ENSI ; pour son soutien immense ;
- ❖ Au tout le corps académique et aux personnels techniques de l'ENSI
- ❖ aux ingénieurs qui ont travaillé sous ma co-direction, à Monsieur **OURO-AGBAKE Hadname**, Monsieur **DIABO Yao Julien**, et Madame **BLU Ayawa Pamela**;
- ❖ mes camarades de promotion, à l'équipe du laboratoire LARSI et du Centre d'Excellence de Recherche et de Maîtrise en Energie (CERME) ;
- ❖ à tous mes étudiants du parcours de la licence et de master ; merci pour votre patience ;

Je tiens également à exprimer ma profonde gratitude à ma famille :

- ❖ à Maman **DOTCHE BLITTI-AGBEGNIGAN II**, gardienne des us du trône royale d'Akladjenou-Ameganpé ; et Monsieur **DOTCHE Kouassi** ;
- ❖ mon oncle, Monsieur **BLITTI-AGBEGNIGAN Messan**, pour son soutien indéfectible sans lequel ce travail n'aurait pas atteint son plein aboutissement ;
- ❖ à ma tante **Mme AKPOSSOU Ayaba Eugénie**, veuillez recevoir, mes sincères remerciements pour votre attention particulière à ma personne ;
- ❖ à Maître **AMEGANKPOE Yaovi** et sa famille pour votre soutien ;
- ❖ à toute la famille **AKPOSSOU** ;
- ❖ à Monsieur **ADANDOGO Agbemébia Nicodème** et sa famille;
- ❖ à Monsieur **KOUDOSSOU Messan** et sa famille ;
- ❖ au Professeur **DIAWUO Kwasi**, Associate Professor, Doyen de la faculté de génie informatique et génie électrique à *University of Energy and Natural Resources-Sunyani*, au Ghana, qui m'a accepté comme un père ;
- ❖ au Professeur. **OFOSU K. Willie**, Professor of Engineering, *University of Penn-State*, USA ; pour avoir pris en charge la grande majorité de mes publications scientifiques et m'avoir permis de participer aux conférences internationales;
- ❖ au Professeur **MITCHUAL Stephen**, Associate Professor, Doyen de la Faculté Technique pour l'Education, *Faculty of Technical Education*, University of Education Winneba-Ghana ;
- ❖ à Monsieur **SEKYERE François**, Lecturer, University of Education Winneba ;
- ❖ à Monsieur **DECKOR Komlan Mawugno** Antoine, pour ton soutien moral ;
- ❖ à Monsieur **TCHIRIOU Gouni**, le bout du tunnel est vraiment mince... ;
- ❖ au Révérend Père **Monsieur SASSOU Kodjo Isidore**, le Curé de la paroisse Ste Thérèse de l'Enfant Jésus de Kégué, pour son soutien moral et spirituel ;
- ❖ au Révérend Père **Monsieur VONDOAME Gilbert**, un ami du lycée technique d'Adidogomé pour son soutien moral et spirituel,
- ❖ à toutes les personnes qui ont contribué de près ou de loin à l'élaboration de ce mémoire thèse.

## Résumé

Les systèmes des télécommunications, particulièrement les réseaux de communications cellulaires terrestres utilisent les systèmes énergétiques hybrides composés : de la source (tension) du secteur, de groupes électrogènes, d'accumulateurs et récemment les énergies renouvelables. L'introduction de ces dernières requiert une prévision de sa disponibilité pour sa récolte surtout dans une politique d'accès universel à l'électricité dans les pays sub-sahéliens comme le Togo où le taux de pénétration de l'électricité est faible. Cependant l'introduction des énergies renouvelables pourrait entraîner une dégradation de la qualité de services des opérateurs (Quality of Service, QoS), et la qualité d'expérience d'utilisateur (Quality of User Experience, QoE).

Cette étude a examiné des approches d'optimisation des systèmes énergétiques de télécommunications et l'intégration des énergies renouvelables pour la vulgarisation du service accès universel (voix et données, et électricité). Le travail a évalué dès l'abord l'optimisation qui a priori a consisté à utiliser des réseaux de neurones artificiels pour évaluer les potentiels et la disponibilité des énergétiques renouvelables telles que : le vent et le soleil sur certains sites sélectionnés du pays. En deuxième point, par une approche numérique, la maximisation du débit dans le déploiement des femto-cellules supportées par une macro-cellule a été étudiée. Par la suite l'optimisation de la perte de puissance due au médium de propagation (l'interface air) est étudiée à partir des données mesurées (de drive test), dans le but de réduire la consommation d'énergie allouée aux modèles de propagation. Enfin, les atouts d'alimenter les sites de communication à partir de l'énergie solaire sont explorés pour les différentes régions du Togo.

**Mots clés :** communication verte, efficacité énergétique/spectrale, énergie renouvelable, intelligence artificielle, maximisation du débit, optimisation à priori

## Liste des acronymes

ADEME	:	Agence De l'Environnement et de la Maîtrise de l'Energie
ACRE	:	Centre coopératif australien pour l'énergie renouvelable ( <i>Australian Research Cooperative Centre for Renewable Energy</i> )
AIEA	:	Agence Internationale de l'Energie Atomique
ANSI	:	Institut Américain Nationale des Standards ( <i>American National Standards Institute</i> )
ASE	:	Efficacité spectrale par unité de surface
ASI-ISA	:	Alliance Solaire Internationale ( <i>International Solar Alliance</i> )
BS /BTS	:	Station de Base ( <i>Base station / Base Transceiver Sub-System Station</i> )
CA	:	Courant Alternatif
CAPEX	:	Capital d'investissement
CC	:	Courant Continu
	:	
COP	:	Conférence de Paris
COST	:	Coopération Européenne en Sciences et Technologies ( <i>European Cooperation in Science and Technology</i> )
COST-IC1004'	:	COST-Cooperative Radio Communications for Green Smart Environments
C2POWER	:	Cognitive Radio and Cooperative strategies for Power, saving in multi-standard wireless devices
CSMA/CD	:	Méthode de prohibition de collision à détection multiple / détection de collision ( <i>Collision Sensing Multiple Avoidance/Collision Détection</i> )
EARTH	:	Energy Aware Radio and neTwork tecHnologies
ECR	:	Ratio d'énergie de consommation ( <i>Energy consumption ratio</i> )
ECR-EX	:	-Étendu sur le cycle de la charge à vide ( <i>-over extended-idle load cycle</i> )

ECR-VL	: À charge variable suivant le cycle ( <i>a variable-load cycle</i> )
ECR-W	: Ratio d'énergie de consommation pondéré (-weighted)
EE	: Efficacité énergétique
ES	: Efficacité spectrale
ETSI	: European Technology and Scientific in Industry
GACGC	: Conseil allemand sur le changement climatique global ( <i>German Advisory Council on Global Change</i> )
GES	: Gaz à effet de serre
GHI	: Irradiation Horizontale Globale ( <i>Global Horizontal Irradiation</i> )
GPS	: Satellite globale de positionnement ( <i>Global Positioning Satellite</i> )
GSM	: Groupe Spéciale Mobile ( <i>Global System for Mobile communications</i> )
GSMA	: Association of Global System for Mobile communication
FDD	: Division à Duplexage de Fréquence ( <i>Frequency Division Duplex</i> )
FDMA	: Accès multiple par répartition de la Fréquence ( <i>Frequency Division Multiple Access</i> )
FPGA	: Portes logiques à champ programmable ( <i>Field Programmable Gate Arrays</i> )
FTTH	: Fibre optique à domicile ( <i>Fiber To The Home</i> )
IAD	: Indice universel d'accès au développement
IEA	: Agence Internationale de l'Energie ( <i>International Energy Agency</i> )
<i>iHOGA</i>	: ( <i>improved Hybrid Optimization by Genetic Algorithms</i> )
IMT-2000	: Système Internationale des Mobiles de Télécommunications ( <i>International Mobile Telecommunications</i> ) - 2000
IPCC	: Groupe d'expert intergouvernemental sur les changements climatiques
IS	: Système Intégré ( <i>Integrated Standard / Interim Standard</i> )
ISA/ASI	: Alliance Solaire Internationale ( <i>International Solar Alliance</i> )

ISO	:	Organisation internationale de la standardisation ( <i>International Standard Organization</i> )
ITU	:	Union Internationale des Télécommunications ( <i>International Telecommunication Union</i> )
KPI	:	Indicateurs de performances clés ( <i>Key Performance Indicators</i> )
	:	
LAM	:	Modèle Linéaire de l’Affaiblissement ( <i>Linear Attenuation Model</i> )
LEAP	:	Planification des énergies alternatives à long terme, ( <i>Long Range Energy Alternatives Planning</i> )
LOS	:	Visibilité directe ( <i>Line of Sight</i> )
LP	:	Programmation linéaire ( <i>Linear programming</i> )
LTE	:	Système Evolué de communications à Long terme ( <i>Long Term Evolution</i> )
MAC	:	Contrôle d’Accès au Médium ( <i>Medium Access Control</i> )
MAPE	:	Erreur Moyenne Absolue en Pourcent ( <i>Mean Absolute Percentage Error</i> )
MATLAB	:	Laboratoire de Matrices ( <i>Matrix Laboratory</i> )
MCS	:	Modulations et schéma de codage ( <i>Modulation and Coding Schemes</i> )
MESSAGE	:	Model pour la stratégie de fourniture de l’énergie et leur général impact environnemental) ( <i>Model for Energy Supply Strategy Alternatives and their General Environmental Impact</i> )
METIS	:	Réseau de communication et mobile sans fil pour 2020 ( <i>Mobile and wireless communications Enablers for the Twenty-twenty Information Society</i> )
MS	:	Station Mobile Equipement utilisateur mobile ( <i>Mobile Station</i> )
Mobile WiMAX	:	Interoperabilité mobile mondiale pour l’accès des réseaux micro-ondes ( <i>Mobile-World -wide Interoperability for Microwave Access</i> )
MLP	:	Perceptron Multicouche ( <i>Multi Layer Perceptron</i> )



NASA	:	Administration Nationale de l'Aéronautique et Spatiale ( <i>National Aeronautics and Space Administration</i> )
NLOS	:	visibilité non-directe ( <i>Non Line of Sight</i> )
NOMA	:	Accès multiple à Répartition non-orthogonale en fréquence/ temps ( <i>Non Orthogonal Multiple Access in Frequency/ Time</i> )
NTIC	:	Nouvelles Technologies de l'Information et de la Communication
ODD	:	Objectifs de Développement Durable
OFDM	:	Multiplexage par répartition orthogonale de la fréquence ( <i>Orthogonal Frequency Division Multiplexing</i> )
OFDMA	:	Accès multiple à Répartition orthogonale de la fréquence ( <i>Orthogonal Frequency Multiple Access</i> )
OPERANet	:	Optimisation du rendement de la puissance dans les réseaux radioélectriques ( <i>Optimising Power Efficiency in mobile Radio Networks</i> )
OPEX	:	Coût opérationnel ( <i>Operational Expense</i> )
OSI	:	Système ouvert interconnecté ( <i>Open System for Interconnection</i> )
$P_{atm}$	:	Pression atmosphérique
PUE	:	Efficacité énergétique d'usage ( <i>Power Usage Effectiveness</i> )
PV	:	Photovoltaïque
QoE	:	Qualité d'expérience d'utilisateur ( <i>Quality of User Experience</i> )
QoS	:	Qualité de services des opérateurs ( <i>Quality of Service</i> )
RAPSIM	:	Simulateur de site isolé pour la fourniture de puissance électrique ( <i>Remote Area Power Supply Simulator</i> )
RB	:	Bloc de ressource ( <i>Ressource Block</i> )
RER	:	Récolte de l'énergie renouvelable ( <i>Energy harvesting</i> )
RF	:	Fréquence radioélectrique ( <i>Radio Frequency</i> )
RBF	:	Fonction de base radiale ( <i>Radial Basis Function</i> )
RMSE	:	Moyenne de l'erreur quadratique ( <i>Root Mean Square Error</i> )
RNA	:	Réseau de neurones artificiels ( <i>Artificial Neural Network</i> )

RTC/M	:	Réseau Téléphonique Conversationnel / et Mobile
$S_0$	:	Durée de l'insolation
SEH	:	Systèmes énergétiques hybrides
SER	:	Sources d'énergies renouvelables
SINR	:	Rapport signal sur interférence et bruit ( <i>Signal to Interference Noise Ratio</i> )
SNR	:	Ratio du Signal sur bruit ( <i>Signal to Noise Ratio</i> )
SOMES	:	Modèle de simulation et optimisation pour les systèmes d'énergie renouvelable ( <i>Simulation and Optimisation Model for renewable Energy Systems</i> )
spa	:	le nombre de communautés disposant d'un système d'alerte publique ( <i>density of alert facility rate</i> )
spc	:	le nombre de communautés disposant d'un centre de communication électronique publique ( <i>subscription per community rate</i> )
spp	:	le nombre d'abonnés individuels ( <i>subscription per person rate</i> )
SSB-FM	:	Technique de modulations à porteuse unique répartie en fréquence ( <i>Single SideBand-Frequency Modulation</i> )
SUI	:	Université Standford Interim ( <i>Standford University Interim</i> )
SVM	:	Machine à support de vecteurs ( <i>Support Vector Machine</i> )
SVR	:	Régression à support de vecteurs ( <i>Support Vector Regression</i> )
STATCOM	:	Convertisseurs statiques de compensation de l'énergie réactive
STC	:	Conditions standard de températures ( <i>Standard Temperature Conditions</i> )
STEP	:	Stations de transfert d'énergie par pompage
TDMA	:	Accès multiple par répartition du temps ( <i>Time Division Multiple Access</i> )
TEER	:	Ratio de l'efficacité énergétique des télécommunications ( <i>Telecommunications energy efficiency ratio</i> )

TEEER	: Mesure de l'efficacité énergétique des équipements des télécommunications ( <i>Telecommunication equipment energy efficiency rating</i> )
TEMS	: Système de test mobile ( <i>Test Mobile System</i> )
TNC	: Compagnie de Transmission électrique du Nigéria ( <i>Transmission Company of Nigeria</i> )
TREND	: Vers la conception réelle des réseaux énergétiques efficaces ( <i>Towards Real Energy-efficient Network Design</i> )
TRIMARAN	: Temps inversé MIMO OFDM à communication verte basé sur les antennes micro-structurées matricielles ( <i>Time Reversal MIMO OFDM green communications based on micRo-structured ANtenna Arrays</i> )
UIA	: Indice global d'accès universel ( <i>Universal Indice Access</i> )
UTRAN- <i>e</i> UTRAN	: Réseau d'Accès Universel Terrestre ( <i>Universal Terrestrial Access Network- evolved-UTRAN</i> )
VRA	: Autorité de la Rivière de Volta ( <i>Volta River Authority</i> )
VSAT	: Terminal à ouverture très petite ( <i>Very Small Aperture Terminal</i> )
WCDMA	: Large bande CDMA ( <i>Wideband-CDMA</i> )
WiFi	: La Fidélité sans fil ( <i>Wireless Fidelity</i> )
WIMAX	: Accès Micro-onde interopérable à grande échelle dans le monde ( <i>World-wide Interoperability for Microwave Access</i> )
$T_{\max}$	: Température ambiante maximale
$T_{\text{moy}}$	: Température ambiante moyenne
$\text{W/m}^2$	: Watt par mètre carré
$\text{Wh/m}^2$	: Wattheure par mètre carré
$\delta$	: Déclinaison solaire
$\Delta T$	: Ecart de température
$\pi$	: Pi, ( $22/7 = 3.1415$ )
$\varphi$	: Latitude du lieu

$\omega_0$	:	Angle horaire au coucher du soleil
J/m <sup>2</sup>	:	Joule par mètre carré
K <sub>T</sub>	:	Indice de clarté
1G	:	First Generation of communication systems
2G	:	Deuxième Génération des systèmes cellulaire (Second Generation cellular systems)
2-, 3-, 4-, 5G	:	Deuxième, troisième, Quatrième, Cinquième, Génération, (Second, Third, Fourth, Fifth Generation)
3GPP2	:	Third Generation Partnership Project Two

<b>Table des matières</b>	
Dédicace .....	i
Remerciements.....	ii
Résumé .....	iv
Liste des acronymes.....	v
Table des matières.....	xii
Liste des Figures .....	xvi
Liste des Tables.....	xviii
Introduction générale .....	- 1 -
Chapitre 1 : Généralité sur l’aspect énergétique des systèmes de télécommunications et intégration des énergies renouvelables .....	- 6 -
1.1. Introduction .....	- 7 -
1.2. Etat de l’art de l’optimisation à priori de la consommation énergétique et de la communication verte.....	- 7 -
1.3. Le réseau d’accès et l’intégration des énergies renouvelables pour une communication verte.....	- 13 -
1.3.1. Les stratégies et approches de réduction de l’énergie dans les systèmes de communications au réseau d’accès.....	- 13 -
1.3.1.1. Les configurations des nœuds dans les réseaux.....	- 13 -
1.3.1.2. Le réseau d’accès des systèmes de communications cellulaires .....	- 14 -
1.3.1.3. Les protocoles de coordination du contrôle de l’accès au média .....	- 15 -
1.3.1.4. Les approches de réductions de l’énergie sur la couche physique .....	- 17 -
1.3.1.5. Les systèmes de télécommunications à énergie verte .....	- 20 -
1.3.2. Potentiels des énergies renouvelables au Togo.....	- 22 -
1.3.3. Les dispositifs de stockage de l’énergie électrique.....	- 26 -
1.3.4. Les stratégies de l’implémentation du l’accès universel à l’électricité et des données .....	- 27 -
1.3.4.1. Le niveau de l’accès universel à l’électricité et des données .....	- 27 -

1.3.4.2. Approches d'implémentation de l'accès universel aux services de voix et données .....	29 -
1.4. Quantification de l'énergie verte de la vitesse du vent et de l'irradiation solaire .....	31 -
1.4.1. Quantification de la vitesse du vent et de l'irradiation solaire.....	31 -
1.4.1.1. La relation entre la vitesse et de la hauteur .....	31 -
1.4.1.2. Quantification des paramètres de la distribution de Weibull .....	33 -
1.4.1.3. Les technologies éoliennes .....	34 -
1.4.2. Quantification de l'énergie photovoltaïque (photopile).....	35 -
1.4.2.1. Le potentiel photovoltaïque .....	35 -
1.4.2.2. La puissance photovoltaïque .....	36 -
1.4.3. Technologies des systèmes photovoltaïques .....	39 -
1.4.3. L'intégration des systèmes d'énergies hybrides par l'utilisation des logiciels .....	39 -
1.5. Conclusion .....	42 -
Chapitre 2 : Approches d'optimisation de la consommation énergétique des systèmes de communications .....	43 -
2.1. Introduction .....	44 -
2.2. La perte de puissance due aux milieux de propagation.....	45 -
2.2.1. Le canal de propagation du signal radioélectrique dans un réseau cellulaire .....	45 -
2.2.2. Le modèle de propagation empirique de l'atténuation du signal .....	46 -
2.2.3. Utilisation de la méthode de régression des moindres carrées .....	48 -
2.3. Optimisation énergétique par intégration des énergies renouvelables ....	52 -
2.3.1. Description du système d'étude .....	52 -
2.3.2. Evaluation de la puissance totale du système .....	54 -
2.3.2.1. Modélisation de la puissance du système .....	54 -
2.3.2.2. Le signal sur bruit et la capacité de la cellule.....	56 -
2.3.3. La capacité et l'efficacité énergétique du système .....	59 -
2.3.3.1. Le débit de transmission et la capacité de transport .....	59 -
2.3.3.2. L'efficacité énergétique par rapport à la puissance de transmission ..	62 -
2.3.3.3. L'efficacité énergétique par rapport à la puissance de consommation.....	63 -

2.4. La programmation linéaire et les méthodes de décision d'attribut multiple	- 66 -
2.4.1. Approches de résolutions analytiques par la méthode de Pareto	- 67 -
2.4.2. Méthode analytique du taux de l'injection des énergies renouvelables	- 71 -
2.5. Etude analytique du taux de l'injection des énergies renouvelables et de la prédiction par l'intelligence artificielle	- 72 -
2.5.1. Prédiction de l'irradiation solaire par les réseaux de neurone artificiels	- 72 -
2.5.2. Les réseaux de neurones biologiques	- 73 -
2.5.3. La prédiction de la vitesse du vent par les 'Support Vector Regression' (SVR)	- 75 -
2.5.4. Les indicateurs de statistiques	- 78 -
2.5.4.1. L'erreur moyenne absolue en pourcentage	- 78 -
2.5.4.2. L'erreur quadratique moyenne	- 79 -
2.5.4.3. Le coefficient de corrélation (R)	- 80 -
2.5.4.4. Le coefficient de détermination ( $R^2$ )	- 80 -
2.6. Conclusion	- 81 -
Chapitre 3 : Les résultats et discussions des contributions	- 82 -
3.1. Introduction	- 83 -
3.2. Contribution à l'optimisation a priori de l'intégration des ressources renouvelables	- 83 -
3.2.1. Implémentation du model de prédiction des potentiels énergétique	- 84 -
3.2.1.1. Le synoptique du système de réseau de neurones artificiels	- 84 -
3.2.1.2. Le logiciel Matlab	- 85 -
3.2.2. Méthodologie de la collecte des mesures et de la configuration des modèles de la prédiction de l'irradiation solaire	- 86 -
3.2.3. Résultats sur la prédiction de l'irradiation solaire	- 88 -
3.2.4. Méthodologie de collecte des mesures et la configuration des modèles de prédiction de la vitesse du vent par le SVM	- 91 -
3.2.5. Les résultats sur la prédiction de la vitesse du vent par le SVM	- 92 -
3.3. Contribution à priori de l'optimalité du nombre de femto/pico-cellules	- 96 -
3.3.1. Méthodologies de simulation de l'étude du compromis de l'Efficacité Energétique (EE) et Spectrale (SE)	- 96 -
3.3.2. Compromis entre l'efficacité énergétique (EE) et spectrale (SE)	- 98 -

3.3.3. Etude de la puissance de rayonnement et de la puissance statique.-	102 -
3.3.4. Effet de l'utilisation de l'énergie éolienne et solaire .....	104 -
3.3.5. Effet de la puissance de transmission par rapport à la densité des terminaux mobiles .....	108 -
3.4. Optimisation a priori de la consommation due au modèle de propagation par la méthode de régression.....	109 -
3.4.1. Méthodologie de collecte de données pour l'optimisation du modèle de propagation.....	109 -
3.4.2. Calibration par la méthode de régression à une pente et deux pentes .....	110 -
3.4.3. Cas pratique de l'optimisation du modèle de propagation par la méthode de régression simple .....	111 -
3.4.4. L'optimisation a priori de la puissance reçue par les réseaux de neurones artificiels.....	112 -
3.5. Contribution à l'atout de l'intégration des énergies renouvelables cas au Togo .....	115 -
3.5.1. L'indice universel d'accès au développement social.....	115 -
3.5.2. Evaluation à l'implémentation du service universel accès aux données .....	117 -
3.6. Conclusion .....	118 -
Conclusion générale et les perspectives.....	120 -
Bibliographie.....	124 -
Listes des publications .....	136 -
Annexe .....	137 -
A. Données relatives à l'irradiation solaire et la vitesse du vent.....	138 -
B. Le modèle de Stanford University Interim.....	142 -
C. La probabilité de la fiabilité de la couverture .....	143 -
D. Transmission optimisée pour le terminal mobile.....	144 -



## Liste des Figures

### Chapitre 1

Figure 1. 1 La consommation en énergie électrique d'une BTS .....	9 -
Figure 1. 2 : Cas de site avec ou sans tiltage .....	18 -
Figure 1. 3: Les attributs d'un système de télécommunications à énergie verte .....	21 -
Figure 1. 4: Caractéristiques des énergies renouvelables .....	23 -

### Chapitre 2

Figure 2. 1: Interface Air de communication.....	45 -
Figure 2. 2: Schématisation du réseau hétérogène avec micro-réseau électrique .-	52 -
Figure 2. 3: Représentation d'un neurone mathématique avec $x_i$ , $y_j$ , $b_j$ et $w_{j,i}$ les entrées, la sortie, le biais et les poids synaptiques .....	74 -
Figure 2. 4 Hyperplan linéaire séparant avec la marge $\Delta$ les différentes classes -	76 -
Figure 2. 5: <b><i>o – insensible</i></b> .....	77 -

### Chapitre 3

Figure 3. 1: Synoptique du système par réseau de neurone .....	84 -
Figure 3. 2: Interface principal de la ntstool de MATLAB .....	85 -
Figure 3. 3: Schéma synoptique de l'architecture des modèles de réseau de neurones avec dix neurones sous la couche cachée .....	86 -
Figure 3. 4: Performance comparative des modèles RBF et MLP .....	90 -
Figure 3. 5: Prédiction de l'irradiation solaire sur plan incliné cas du site de Lomé .....	90 -
Figure 3. 6: Production annuelle sur quelques sites .....	91 -
Figure 3. 7: Prédiction de la vitesse du vent: cas du site de Lomé .....	94 -
Figure 3. 8 Analyse comparative de la vitesse prédite et mesurée .....	94 -
Figure 3. 9: Evaluation de la puissance éolienne récupérable .....	95 -
Figure 3. 10: Efficacité spectrale avec NOMA.....	98 -

Figure 3. 11: Analyse montrant le snr vs EE; snr vs ASE; ASE vs EE (1<sup>er</sup>) .....- 99 -

Figure 3. 12 : Analyse montrant le snr vs EE; snr vs ASE; ASE vs EE (2<sup>ème</sup>)- 100 -

Figure 3. 13: Analyse comparative de snr vs EE; snr vs SE; SE vs EE (3<sup>ème</sup>) - 100 -

Figure 3. 14: Effet de la puissance émise et le nombre de petite cellule .....- 102 -

Figure 3. 15 : Puissance statique variante sans introduction des ER.....- 103 -

Figure 3. 16: Effet de la puissance statique à une irradiation variante .....- 104 -

Figure 3. 17: Effet de la puissance statique à une vitesse du vent variable .....- 105 -

Figure 3. 18 : Puissance statique et effet de l'intégration des ER .....- 105 -

Figure 3. 19 Effet de la puissance statique fixe à une irradiation et une vitesse du vent variable (de l'ER).....- 106 -

Figure 3. 20: Considération des modules solaires .....- 107 -

Figure 3. 21: Effet de la proportion des ERs .....- 107 -

Figure 3. 22: Effet de la puissance de transmission.....- 108 -

Figure 3. 23 : Efficacité spectrale sur les liaisons ascendante et descendante .....  
.....- 108 -

Figure 3. 24 : Les matériels du drive test en place .....- 109 -

Figure 3. 25 : Calibration avec une pente et deux pentes .....- 110 -

Figure 3. 26 : Comparaison de l'erreur sur les modèles SUI et COST231 .....- 112 -

Figure 3. 27 : Analyse comparative des méthodes de régression avec le RNA .....  
.....- 114 -

## Liste des Tables

### Chapitre 1

Tableau 1. 1: L'évolution des technologies cellulaires .....	19 -
Tableau 1. 2 Les sources de production électrique disponible au Togo .....	25 -
Tableau 1. 3: Requis en génération électrique à l'électricité access-universel à l'horizon 2030 .....	29 -
Tableau 1. 4: Technologies de cellule photovoltaïque .....	39 -
Tableau 1. 5: Récapitulation des logiciels de simulation des SEH.....	41 -

### Chapitre 3

Tableau 3. 1 Corrélation entre l'irradiation solaire et chacune des variables....	86 -
Tableau 3. 2: Caractéristiques statistiques des séries de données journalières .-	87 -
Tableau 3. 3 Les différents modèles utilisés pour l'entraînement du réseau de neurone pour la prédiction de l'irradiation solaire.....	88 -
Tableau 3. 4 Performances des différentes configurations .....	88 -
Tableau 3. 5. Description statistique des données .....	92 -
Tableau 3. 6. Les différentes configurations d'entrées .....	92 -
Tableau 3. 7: Performances des différentes configurations.....	92 -
Tableau 3. 8: Paramètres de simulation pour l'évaluation de l'affaiblissement-	96 -
Tableau 3. 9: Paramètres de l'environnement de simulation.....	97 -
Tableau 3. 10: Comparaison entre le modèle COST-231 et le modèle SUI....-	111 -
Tableau 3. 11 : Evaluation du modèle de calibration RNA-MLP .....	113 -
Tableau 3. 12 Résultats comparatifs de la méthode proposée .....	113 -
Tableau 3. 13: Nombre de nœuds de communication cellulaire .....	115 -
Tableau 3. 14 : Application du critère de l'IAD par région.....	116 -
Tableau 3. 15 : Coût de l'installation et la puissance injectée.....	117 -

## **Introduction générale**

Les systèmes des télécommunications, particulièrement les réseaux de communications cellulaires terrestres utilisent les systèmes énergétiques hybrides composés de la source du secteur, les groupes électrogènes, les accumulateurs et récemment les énergies renouvelables. L'introduction de ces dernières requiert une prévision de sa disponibilité pour une production électrique. L'intégration des énergies renouvelables dans les réseaux de télécommunications pour alimenter les nœuds de transmission ou des stations de bases (BS, BTS, Node-B, E-Node-B), présente un grand intérêt, mais pourrait affecter la qualité de services des opérateurs (Quality of Service, QoS), et la qualité d'expérience d'utilisateur (Quality of User Experience, QoE) [48], [34], [119]. Par ailleurs, la vision des objectifs de développement durable (ODD) et de la troisième révolution industrielle mondiale exigent une utilisation des systèmes d'énergies renouvelables pour accompagner les progrès technologiques [108]. Au regard des études effectuées à ce jour, soulignent que l'ajout à près de 40% de l'énergie renouvelable à l'énergie classique du secteur de source d'énergie électrique thermique entrainerait une dégradation de 8% sur la qualité du service offert, (QoS) [96] compte tenu de leur intermittence. En plus, le coût opérationnel (OPEX) d'une station de base est élevé par an dans les zones urbaines, et si l'on considère l'exploitation en milieu rural, ce coût reviendrait dix fois plus cher en raison de leur fonctionnement sur les groupes électrogènes [62] par leur consommation de gasoil. Cela explique la migration vers les standards cellulaires de technologies évoluées qui vise à offrir un meilleur QoE et QoS aux utilisateurs mais aussi à réduire la consommation énergétique des nœuds [18] tels que le Long-Term Evolution (LTE) ou la 4<sup>ème</sup> génération (4G), la 5<sup>ème</sup> génération (5G) et de génération future. En Afrique, les réseaux de télécommunications disposent d'une couverture plus élargie du territoire national par rapport aux réseaux de distribution électrique. Par exemple, l'opérateur Togocellulaire dispose d'un taux de pénétration qui est estimé à plus de 90% par rapport à la population et 75% pour la couverture nationale alors que celle du réseau de distribution électrique est à près de 35,81% en moyenne et seulement de 7% en zones rurales [27]. D'une part, cela représente un réel problème au développement dans les milieux enclavés, les zones rurales. D'autre part, la puissance électrique parfois élevée des nœuds et la taille importante des batteries de stockage posent un problème de coût. La

rentabilité économique requiert de doter chaque station de base de son panneau solaire ou de son éolienne, ou encore de disposer d'une ferme énergétique alimentant plusieurs nœuds. C'est dans ce sens qu'une étude similaire a été faite en exploitant une architecture homogène des antennes relais de types macro-cellules alimentées à partir d'une énergie thermique avec l'introduction des énergies renouvelables pour réduire le taux de dioxyde de carbone [54] mais l'hétérogénéité des cellules et la maximisation du débit n'ont pas été considérées.

Le contexte de cette thèse s'inscrit dans la vision de l'université de Lomé qui vise à promouvoir les projets de développement et de l'utilisation des énergies renouvelables hybrides. Depuis un certain temps, le Laboratoire de Recherche en Sciences de l'Ingénieur (LARSI) au sein duquel ce mémoire de thèse fut élaboré ; s'attèle aux sources énergétiques renouvelables pour encourager la production d'énergies électriques dans les objectifs de développement durable (ODD). Cette thèse se focalise beaucoup plus sur les réseaux de communications cellulaires mobiles terrestres. Un des défis de la migration vers les standards cellulaires de technologies évoluées tels que le Long-Term Evolution (LTE) ou la 4<sup>ème</sup> génération (4G), la 5<sup>ème</sup> génération (5G), et de générations futures est la réduction de la consommation énergétique des nœuds. Dans ces standards, les fréquences porteuses sont très élevées et les cellules sont de petites tailles d'où la nécessité du choix judicieux du nombre de cellules afin de limiter l'exposition du rayonnement sur les humains et l'écologie.

L'étude élaborée dans cette thèse est une extension des travaux de Gu [54] et de Guanyao *et al.* [55]. La production d'énergie électrique à partir des sources énergétiques renouvelables (SER) est difficile compte tenu de leur intermittence. La prédiction de leur disponibilité à court terme est fondamentale à leur exploitation. L'approche originelle de cette étude réside dans la quantification de l'effet de l'intégration des énergies renouvelables (les centrales photopiles, ou éolienne) pour l'alimentation des points d'accès sous la contrainte de maximisation du débit dans le déploiement des femto-cellules. Cela s'inscrit dans la vision de la réduction de l'empreinte du carbone, la facilité d'expansion à une grande échelle, et est une réponse au défi de l'augmentation sans cesse des abonnés. Dans les zones sensibles telles que les aéroports, l'utilisation de nombreuses sources

d'approvisionnement renforcera la sécurité énergétique, en particulier l'intégration des sources d'énergie renouvelables. De ce fait, la prédiction de la disponibilité de sources d'énergies renouvelables (hybrides) au déploiement, est essentielle. Elle est réalisée par l'utilisation des réseaux de neurones artificiels. De même, l'optimisation de l'efficacité énergétique et spectrale, est anticipée par le déploiement d'architectures hétérogènes à un nombre des femto-cellules résultant d'un compromis. Il faut ajouter que l'optimisation du modèle de propagation à utiliser pour le déploiement permet la réduction de la puissance de rayonnement. Cette thèse s'articulera sur le système d'alimentation électrique, la puissance de rayonnement et à l'effet de l'atténuation dû à l'environnement. Les solutions développées dans cette thèse, s'inscrivent dans les méthodes d'optimisation de la consommation énergétiques dans les systèmes de communications cellulaires terrestres qui sont applicables à la couche physique du modèle de l'organisation internationale de la standardisation ISO- et de l'organisation internationale des objets-interconnectés OSI (*open system for interconnection*). C'est ainsi que l'objectif général de la thèse est d'examiner les approches d'optimisation a priori de la consommation énergétique des systèmes de télécommunications et l'intégration des énergies renouvelables dans l'implémentation du service accès et universel sous contrainte de la maximisation du débit. Le travail évaluera la disponibilité de la source d'énergie renouvelable, l'atténuation de l'interface air, l'efficacité énergétique (EE) et spectrale (SE) dans une architecture hétérogène des cellules et l'atout de l'intégration des énergies renouvelables dans l'implémentation du service à accès universel. Les tâches spécifiques à l'objectif général sont les suivantes :

- élaboration d'un modèle de prédiction des potentialités des sources d'énergies renouvelables (l'irradiation solaire et la vitesse du vent) par des réseaux de neurone artificiels, et les machines à vecteurs de support (SVM) ;
- formulation de l'efficacité spectrale en fonction de l'énergie renouvelable dans l'alimentation des nœuds avec l'optimalité du nombre de nœuds par la méthode de la programmation linéaire (méthode de Pareto) ;

- optimisation de la consommation énergétique due au modèle de propagation par une méthode de régression à partir de la collecte des mesures obtenues d'un drive test ;
- formulation des atouts de l'alimentation des nœuds par l'intégration de l'énergie renouvelable (cas de l'énergie solaire) pour l'implémentation du service d'accès universel aux données.

Les thématiques de l'objectif général sont transcrits dans les questions suivantes.

- Quels sont les méthodes utilisées pour optimiser la consommation énergétique dans un système de télécommunications ?
- Comment l'optimisation de la consommation énergétique dans les systèmes de télécommunications est-elle réalisée avec l'intégration des énergies renouvelables?
- Comment l'intégration des énergies renouvelables contribue-t-elle à l'implémentation du service d'accès universel ?

Le reste de la thèse est structurée tel que le premier chapitre présente les aspects généraux des énergies renouvelables et des systèmes de communication verte. Le deuxième chapitre s'est orienté sur la modélisation de l'optimisation de la consommation énergétique des systèmes de télécommunications dans le cas des réseaux cellulaires hétérogènes. Les techniques d'optimisation par rapport à la couche physique du modèle OSI sont détaillées et la méthodologie de résolution des problèmes d'optimisation ainsi que l'intégration des énergies renouvelables par l'intelligence artificielle. Par ailleurs, le chapitre trois présente. La collecte des données est amplement expliquée de même les résultats, les discussions y afférentes et les déductions qui en découlent. Enfin, une conclusion générale est donnée et des perspectives de recherche future, liées à la problématique sont formulées.



# **Chapitre 1 : Généralité sur l'aspect énergétique des systèmes de télécommunications et intégration des énergies renouvelables**

## **1.1. Introduction**

L'accès universel à l'électricité est une nécessité de base. Il est une métrique de la disponibilité de l'énergie électrique à soutenir les activités génératrices de revenus et les services sociaux. En se référant, aux systèmes de télécommunications, l'indice global d'accès universel aux services d'utilisation sociale sert à indiquer le niveau acquis des objectifs visés d'accès aux services de la voix et des données dans un pays. Compte tenu du rôle de l'énergie dans les systèmes de communications, la mise en place d'une politique de développement de l'accès aux données demande un niveau élevé du taux d'électrification. Aussi, les effets néfastes du changement climatique imposent l'utilisation d'énergies propres. La communication verte qui comprend toutes les techniques de réduction de la consommation énergétique des systèmes de communications par une introduction graduelle ou complète de sources d'énergies renouvelables (SER) et des techniques de récolte de l'énergie renouvelable (RER) s'imposent de nos jours.

## **1.2. Etat de l'art de l'optimisation à priori de la consommation énergétique et de la communication verte**

Cette section présente la littérature sur la consommation énergétique dans les réseaux cellulaires et l'apport de l'intégration des énergies renouvelables.

Les infrastructures des systèmes des nouvelles technologies de l'information et de la communication (NTIC), présentent de l'ordre de 2-4% du taux une consommation énergétique mondiale, et globalement, elles émettent beaucoup de dioxyde de carbone estimé, de l'ordre de 1,43 milliard de tonnes. Les infrastructures des télécommunications seules représentent 25 à 28% du taux total d'émission du dioxyde de carbone (gaz à effet de serre, GES), les matériels bureautiques 57%, les centres des serveurs 18%. Le secteur des réseaux mobiles contribue à 43% avec une émission due à des unités radios estimée environ entre 80 et 90% [1-2]. Par ailleurs, il a été indiqué à la référence [75] qu'au regard de l'architecture des systèmes de télécommunications, il y a pratiquement 65% de l'énergie consommée par les

réseaux domestiques d'abonnés privés soit par une utilisation d'une connexion ADSL ou de la fibre optique 'Fiber To The Home (FTTH)'.

La quantification de l'énergie consommée dans les systèmes des télécommunications a beaucoup posé de problème aux experts. Dans les centres de traitement de données, le facteur énergétique défini par la réglementation émise par 'The Green Grid' [119], est l'Efficacité dans l'Utilisation de l'Énergie (PUE, Power Usage Effectiveness). La définition de l'efficacité énergétique, selon 'European Technology and Scientific in Industry' (ETSI), vise la réduction de la consommation énergétique dans les milieux à faible trafic tel qu'en milieu rural ; par contre en milieu urbain, il sera d'intérêt d'optimiser le spectre, car le trafic est dense [62]. Le modèle de l'ETSI a proposé le ratio de la consommation de l'énergie (Energy consumption ratio, ECR) comme une métrique pour les systèmes de communication du Groupe Spécial Mobile ou 'Global system for mobile communication' (GSM).

L'efficacité énergétique (EE) est l'ensemble des moyens qui doivent être mis en œuvre en vue de réduire la consommation de l'énergie d'un processus à service égale et l'optimisation de l'empreinte du carbone [61]. L'EE est essentielle dans la transmission d'une information dans les réseaux sans fils [6]. L'optimisation de l'efficacité énergétique est examinée par un algorithme heuristique de routage dans un réseau de data center à architecture hiérarchisée et centralisé avec une proposition de l'extinction des routeurs non actifs [133] qui permet la conservation de l'énergie. L'étude sur des réseaux maillés utilisés comme un réseau dorsal a indiqué que la combinaison du contrôle de puissance avec le problème du routage et d'ordonnancement permettent d'avoir une bonne conservation d'énergie entre 30% et 70% avec un gain moyen en capacité à peu près 13%. En plus, l'amélioration de la capacité du réseau maillé est liée en particulier à la zone autour de la passerelle. La meilleure configuration a consisté à connecter directement tous les nœuds de cette zone à la passerelle, ensuite leur allouer des fortes modulations et schéma de codage (MCS) [101]. L'énergie consommée par l'unité de traitement a été quantifiée en fonction du nombre de commutation effectué  $k$ , celui-ci étant proportionnelle à l'énergie consommée [24]. Cette consommation est optimisée par

l'utilisation des processeurs intégrés tels que les Field Programmable Gate Arrays [128], [124].

On peut noter des cas spécifiques d'étude de la consommation énergétique par différents segments d'un réseau de télécommunications. La consommation énergétique d'un site de l'opérateur Orange en téléphonie mobile au Cameroun a été quantifiée [12], par l'exploitation du modèle proposé à la référence [42] qui a inclus les consommations de la climatisation et de l'éclairage du locale dans la puissance statique. La formulation standard linéaire de la consommation de puissance à un nœud connecté [81], n'inclut pas la puissance de l'éclairage du locale. La puissance consommée de la BTS est modélisée en fonction des circuits principaux tels que celui lié au trafic par une méthode de régression linéaire [42]. La quantification de la consommation énergétique des différents segments d'un réseau de télécommunications a été reporté dans les travaux de la référence [44]. L'étude de la consommation de puissance du réseau téléphonique conversationnel (RTC) et mobile (RTM) de France Télécom [44] a relevé que l'alimentation de certains équipements de télécommunications en mode continu entraînerait une réduction de 15-20% (voir Figure 1.1) de la puissance électrique consommée dans le circuit de la transmission. La consommation en énergie électrique d'une BTS est illustrée à la Figure 1.1.

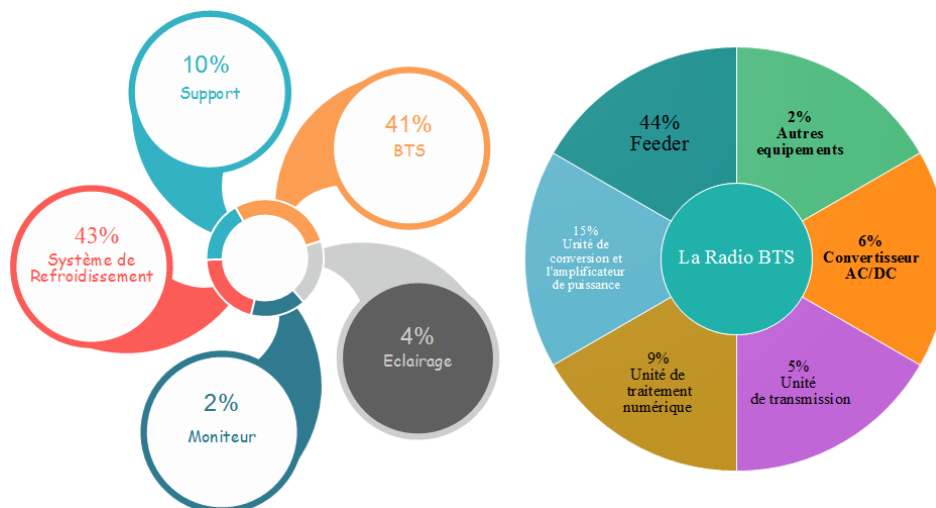


Figure 1. 1 La consommation en énergie électrique d'une BTS

En cela, pour atteindre une bonne efficacité énergétique, il y a la nécessité de réduire les conversions inutiles d'énergie. En plus, il est reporté que lorsque le trafic

augmente de 1 Erlang, la puissance augmente de 3W. Il faut ajouter que les tentatives d'appels répétitifs par les utilisateurs mobiles pour accéder aux ressources du réseau génèrent du trafic supplémentaire sur le réseau [57] et par conséquent une augmentation de la consommation électrique.

L'allocation de ressource a été considérée, dans un réseau cellulaire dont les BTS sont groupés et alimentés par un micro-réseau, une centrale hybride à énergie renouvelable. Le travail a évalué la minimisation du coût global de l'énergie et a assigné les usagers suivant le coût et de l'énergie disponible dans un groupe de BTS [124]. L'optimisation de la transmission pour le terminal mobile avec le protocole de la réservation de la bande est proposée à la référence [104] et la méthode d'extinction a été utilisée dans un réseau à fibre optique [82], dénommée le projet N-Green. De plus dans les réseaux de communication optique ; la réduction de la consommation énergétique des amplificateurs peut être réalisée par une technique de la non régénération [35]. Dans les réseaux de communication cellulaire, il est souligné que la consommation en mode veilleuse (idle) n'est pas négligeable et demeure donc pertinente dans l'évaluation de l'EE [113]. L'extinction des cellules où aucun utilisateur n'est détecté suivant un paramètre discriminatif des états des usagers a été proposé à la référence [31]. C'est dans ce sens qu'un outil de localisation est proposé pour équiper le téléphone mobile utilisateur et la station de base suivant le principe de la détection de la couverture et de l'inter-activité [36].

L'amélioration de l'efficacité énergétique (EE) dans les réseaux sans fil dépend beaucoup plus des protocoles de la couche d'accès au média 'Medium Access Control (MAC)' [136] et [28] ; où les amplificateurs des circuits de modulation consomment beaucoup d'énergie [87] et [122]. Une efficacité spectrale optimale requiert une modulation robuste avancée qui en retour demande plus d'énergie électrique [128]. Les techniques d'annulation de l'interférence ont été proposées pour améliorer la capacité des macro-cellules [7]. Toutefois, le déploiement des relais de type macro-cellules consomment énormément et engendrent une pollution de l'environnement par leurs émissions de CO<sub>2</sub>. C'est dans ce sens que l'efficacité spectrale (SE) peut être améliorée avec le déploiement de cellules de petites tailles, permettant ainsi d'obtenir un rapport de consommation

d'énergie moindre [73], et [138]. Cependant l'intégration des énergies renouvelables n'a pas été étudiée. La disposition en couches hiérarchisées est également proposée avec le multiplexage par répartition orthogonale de la fréquence (OFDM) avec une coopération multicellulaire [90], et [74]. L'accès multiple par la division du faisceau rayonné a été proposé comme une solution palliative pour les prochaines générations des systèmes de communication mobile [67] cela permettra de maximiser la capacité. Le rapport de couverture à la transmission optimale de la station d'émetteur-récepteur de base a été étudié [136]. La maximisation du débit par l'utilisation de femto-cellules a été reportée dans la littérature [84], [59]. Alors que les résultats [98] ont indiqué que la LTE était efficace sur le plan énergétique, en raison du fait que le protocole de gestion de l'énergie reposait sur le mode de réception discontinue (DRx) et le mode de transmission discontinue (DTx) pour l'utilisateur final (le mobile). Ce mécanisme est efficace pour minimiser la batterie du terminal mobile (utilisateur). En revanche, l'étude de la référence [7] a sous-estimé ces techniques d'amélioration de l'efficacité énergétique. Par ailleurs, le compromis est analysé entre les problèmes EE et SE pour un canal de bruit gaussien additif point à point (AWGN) où l'émetteur est alimenté uniquement par la récupération (collecte) de l'énergie suivant la fréquence de transmission [130]. Un algorithme de gestion des ressources radios, et une règle d'auto-organisation basée sur la minimisation des transactions inter-cellules ont été proposés [65], [86]. La méthode de visualisation des cellules avec un taux de trafic faible a été proposée en [133] où la réduction de l'énergie a été étudiée dans les réseaux cellulaires suivant le nombre de stations de bases actives. L'étude avait proposé la mise en mode veille des stations de bases, lorsque ceux-ci auraient constaté un flux de trafic relativement faible ou suivant un niveau préprogrammé de façon saisonnière à l'aide des algorithmes stochastiques. Le modèle de Holt-Winter [93] est basé sur le principe des algorithmes stochastiques pour l'évaluation du trafic est basé sur la connaissance parfaite de l'historique des canaux dans la journée. Le modèle suppose que le trafic dans une cellule a un caractère historique. Le modèle est étudié dans la référence [93], où deux stratégies avaient été considérées par rapport au niveau du signal et le taux de trafic. En utilisant les méthodes de prédictions saisonnières, les solutions ont montré des résultats où l'économie d'énergie était évaluée à près de

25-30% selon les études conduites par le projet Energy Aware Radio and neTwork tecHnologies (EARTH).

Le coût de l'investissement de l'hétérogénéité des cellules a été étudié, les résultats ont montré que ce coût s'élève en rapport avec la complexité de déploiement des cellules et de la technologie de communication [78]. Le transfert d'énergie électrique par onde électromagnétique a été étudiée dans l'allocation des ressources par les méthodes d'accès en temps partagé, et de la non-orthogonalité dans le but d'augmenter la profondeur de décharge des nœuds de communications [102]. De même la récolte d'énergie par la méthode instantanée de transfert de puissance sans fil dans un système à antennes distribuées (DAS) avec une configuration MIMO des unités radios a été reportée comme un moyen d'améliorer l'efficacité énergétique des systèmes mobiles de communication futurs [20]. L'analyse de la consommation énergétique dans un réseau homogène et hétérogène comprenant d'une part une macro-cellule ; et d'autre part une macrocellule et une micro-cellule respectivement, a indiqué que le réseau hétérogène consomme beaucoup plus que le réseau homogène à macro-cellule [8]. Cela s'explique par la conception des amplificateurs de puissance de la micro-cellule qui était moins efficiente. Les résultats de l'étude sur la consommation énergétique dans un réseau dense homogène à macrocellule et ceux des réseaux hétérogènes à cellules hiérarchisées avec le support réseau (le réseau dorsal) ont indiqué que la consommation énergétique du réseau homogène dense est plus élevée que ceux des réseaux hétérogènes à cellules hiérarchisées [123]. La minimisation de la transmission de puissance du terminal mobile a été examinée dans une architecture hiérarchisée du réseau comprenant une antenne macro-cellule et une antenne relais non-transparent d'expansion de la couverture. Les résultats ont indiqué que la couverture radio du relais augmente avec le coût opérationnel (coût d'exploitation) [55]. Cependant, la minimisation de la puissance transmise du terminal mobile est optimale quand la couverture radio du relais a été choisie à près de 50 à 70% de la couverture radio de la macro-cellule. Par ailleurs l'introduction des énergies renouvelables a été étudiée dans un réseau cellulaire homogène à macro-cellules alimenté par une énergie thermique [54].

### **1.3. Le réseau d'accès et l'intégration des énergies renouvelables pour une communication verte**

Les transferts de ressources radios dans les systèmes de communications sans fil s'effectuent grâce à l'interface air et le réseau d'accès. Le choix de la configuration des réseaux contribue à optimiser à priori la consommation de l'énergie à la planification.

Cette section présente les solutions de la couche logique par l'utilisation des protocoles de coordinations aux médias et de la couche physique. Les concepts de l'intégration des énergies renouvelables et de la communication verte pour un service à accès universel sont expliqués.

#### **1.3.1. Les stratégies et approches de réduction de l'énergie dans les systèmes de communications au réseau d'accès**

Cette section présente le réseau d'accès, qui est la partie la plus visible d'un système de communication.

##### **1.3.1.1. Les configurations des nœuds dans les réseaux**

La configuration du système de transmission peut être soit d'un nœud à un autre nœud (une configuration point à point) ou d'un nœud à plusieurs nœuds (une configuration point à multipoints).

Les deux techniques de transmissions sont le filaire et le sans-fil. Par exemple, un système de transmission sans fil à faisceaux hertziens facilite une mobilité des nœuds mobiles mais elle n'est pas sécurisée, comme le cas du réseau d'accès et les utilisateurs mobiles. La transmission par les faisceaux hertziens peut être utilisée pour les équipements du réseau d'accès. La transmission par le câble coaxial est limitée et requiert une adaptation d'impédance aux points extrêmes. Elle fait aussi l'objet des interceptions comme les faisceaux hertziens. Il faut ajouter que la transmission par la fibre optique est immunisée de toutes imperfections, et reste



la plus fiable que les autres médias de transmission. L'utilisation d'un type de média de transmission requiert une évaluation du bilan énergétique (de puissance) de transfert. Lorsque le système est avec des relais répéteurs, les pertes en ligne peuvent s'augmenter ce qui rend le système moins efficient énergétiquement. Dans le cas d'une liaison à fibre optique, l'utilisation des amplificateurs tout au long de la ligne peut entraîner des distorsions et plus de consommation d'énergie.

Dans une architecture de cellules homogènes, les cellules utilisées sont les mêmes. Généralement, dans le cas de réseaux de communication de type cellulaire, ce type de configuration est identifié à un réseau de type macro-cellule. Par ailleurs, la configuration hétérogène des cellules vise à réduire la consommation énergétique du réseau par un déploiement des cellules mixtes à tailles variées à faible puissance telles que les femtocellules et les picocellules, les microcellules et les macrocellules supportées par une alimentation à énergie verte.

Les techniques de réduction de l'énergie par rapport à la densité des nœuds sont importantes pour optimiser la consommation énergétique des systèmes de télécommunications particulièrement les systèmes à architecture hétérogène des cellules.

Dans un réseau à architecture dense, on y rencontre une intégration ou une convergence des autres technologies de communication telles que les réseaux de communication cellulaire, LTE, Mobile-WiMAX, le Wi-Fi, le super-WiFi, etc.

### **1.3.1.2. Le réseau d'accès des systèmes de communications cellulaires**

Une unité de ressource radio est un ensemble des paramètres de transmission physique par rapport à un service. Les équipements utilisent une ou plusieurs ressources radio pour accéder à l'interface air qui est caractérisé par deux types de liaisons de communications : le lien ascendant (*uplink*) et descendant (*downlink*). La liaison ascendante (montante) est utilisée pour transmettre les signaux d'un usager ou terminal mobile (MS) vers un nœud la station de base (BS). La BS exécute le traitement des signaux de base. Par contre la liaison descendante est utilisée par

la BS pour transmettre le signal de base aux MS qui se trouvent dans son périmètre ou sa cellule. Le nom du réseau d'accès est relatif à la génération du système cellulaire respectivement Network Sub-System (NSS de 2G), Universal Terrestrial Access Network (UTRAN) de 3G. Un evolved-UTRAN (eUTRAN) de 4G a une architecture simplifiée (comparé à un UTRAN de 3G) par l'intégration dans les stations de base eNode B des fonctions de contrôle qui étaient auparavant implémentées dans les contrôleurs de stations de bases appelés RNC (*Radio Network Controller* de la 3G) et les *Base station controller* (BSC) des réseaux RAN (Radio Access Network). Les principales améliorations de la LTE-Advanced (LTE-A) qui est un standard de réseau mobile de la 4G [123] sont :

- agrégation de porteuses : consiste à servir un utilisateur sur plusieurs porteuses en même temps, cela permet d'obtenir une largeur de bande d'environ 100 MHz (agrégation de cinq porteuses de largeur de bande de 20 MHz) avec laquelle on peut atteindre un débit de 1 Gbits/s en voie descendante ;
- support d'un réseau hétérogène : c'est un avantage important de LTE-A qui consiste à déployer des stations (pico, femto, relai) de faible puissance dans des cellules macro; cela permet d'améliorer la qualité de service (le débit en particulier) dans des zones à forte densité de population ou mal couvertes ;
- utilisation d'antennes multiple : LTE-A et les réseaux de communications mobiles futures exploitent un mode de transmission qui prend en charge la configuration MIMO en voie descendante.

### **1.3.1.3. Les protocoles de coordination du contrôle de l'accès au média**

L'accès à l'interface air est coordonné par les protocoles de la couche liaison du modèle '*open system for interconnection*' OSI, les protocoles de coordination du contrôle de l'accès au média (MAC).

Les protocoles MAC permettent de gérer la consommation énergétique et de réguler l'accès aux ressources radios de tous les périphériques de transmission connectés à

la couche physique. Il existe trois classes des protocoles de type à accès aléatoire, à accès centralisé ou à accès fixe, et les protocoles sur l'adaptation de la demande.

Les protocoles de type à accès aléatoire ou les protocoles sur contention sont basés sur le principe de transmission aléatoire offert aux terminaux mobiles en un temps partagé. Dans cette classe de protocoles, tous les nœuds ont le même le droit à condition que chacun doit écouter le canal de transmission. Pour éviter des collisions entre la transmission des données, les protocoles suivants sont utilisés *Collision Sensing Multiple Avoidance/Collision Détection (CSMA/CD)*, le *Slotted Aloha* et la réservation de paquets à accès multiples. Ce mode est adéquat aux réseaux de capteurs sans fil et les systèmes de transmission satellitaire. Ce type de protocole n'est pas viable économiquement en raison de l'écoute permanent du canal.

Les protocoles de type à accès centralisé ou accès fixe (sans contention) fixent et garantissent l'autorisation d'envoi à un seul terminal mobile une fois dans le but d'éviter la collision des messages sur les médias partagés. Il y a un nœud centralisé qui est appelé un point d'accès, chargé de coordonner la transmission basée sur les techniques à l'accès multiple par répartition en fréquence (FDMA), l'accès multiple par répartition dans le temps (TDMA). La FDMA et le TDMA sont utilisés dans le réseau d'accès radio du GSM, et l'accès multiple par division de code (CDMA) qui utilise un pseudo code attribué à chaque utilisateur qui veut accéder aux ressources radios dans un réseau 3G. Par exemple dans un réseau 4G, avec le réseau d'accès radio du Long Term Evolution (LTE), l'accès multiple par répartition orthogonale de la fréquence (OFDMA) est utilisé sur la liaison descendante, et à porteuse unique (Single Carrier, SC-OFDMA) sur la liaison ascendante du LTE et LTE-Advanced (LTE-A), l'accès multiple non-orthogonal en fréquence (NOMA) pour les réseaux d'accès radio hétérogène, et l'accès multiple par division spatiale (SDMA). Récemment, le protocole *harvest and transmit*, a été proposé pour les réseaux de capteur sans fil à auto-alimentation basé sur la récupération de l'énergie radioélectrique.

Les protocoles à accès centralisé sont beaucoup utilisés dans les réseaux de communication de téléphonie mobile moderne, en raison du service d'endormissent

qu'ils offrent (pendant les slots où les nœuds sont inactifs). Cependant, leur performance est limitée par les interférences et le bruit du canal pour cela ceux-ci nécessitent une puissance de transmission élevée afin de vaincre les imperfections du canal.

Les protocoles sur l'adaptation de la demande permettent aux terminaux mobiles d'accéder au réseau selon leur demande. Ceux-ci combinent les atouts des deux premiers. Les modes d'accès sont tels que : le premier entré le premier servi (First In First Out, FIFO), le dernier arrivé le premier servi (Last In First Out, LIFO), service sur la durée de séjour la plus courte en premier (Earliest Deadline First, EDF).

#### **1.3.1.4. Les approches de réductions de l'énergie sur la couche physique**

Pour améliorer l'efficacité de transmission et réduire la consommation de l'énergie due à la couche physique, l'adaptation de schéma de modulation et le codage (MCS) du canal est utilisée. Dans la réduction de l'énergie dans les systèmes de communication, le codage du canal permet considérablement de minimiser la perte d'énergie [21] par un bon confinement du signal émis en transit vers le point récepteur. Cela permet une adaptation aux conditions du canal radio et d'éviter des retransmissions qui peuvent coûter cher en énergie et de réduire la puissance de transmission. Les techniques de précodage et de préfiltrage techniques sont également utilisées afin d'adapter le signal de réception au canal de transmission. Le contrôle dynamique de puissance du nœud est une technique classique utilisée mais reste très dépendant de la puissance de transmission maximale [6]. Cela permet d'une part, de réduire les interférences et d'augmenter la capacité et d'autre part, de réduire la puissance de transmission ce qui entraîne une conservation d'énergie importante. La technique du formatage du faisceau permet de modifier le diagramme de rayonnement de l'antenne. Le tiltage (pointage) est une (ré)orientation du faisceau qui peut se faire électriquement ou mécaniquement.



Avec angle de tiltage négatif

Sans tiltage ( $0^\circ$  angle de tilt)

Figure 1. 2 : Cas de site avec ou sans tiltage

Il existe en général deux façons de tilter une antenne qui sont le tiltage mécanique, et électrique. Les tiltages électrique et électronique des phases permettent de contrôler le trafic. Le tiltage mécanique est utilisé pour ajuster la couverture. Il y a deux types de tilts mécaniques : le tiltage à angle positif et celui à angle négatif (voir Figure 1.2).

Il faut augmenter la puissance de rayonnement, lorsque le nombre d'abonnés augmente. Cette méthode peut générer d'autres formes d'interférences dans les cellules adjacentes. Quelque fois, il y peut être nécessaire de déployer de nouvelles cellules. Cependant cette dernière solution engendre des coûts supplémentaires d'exploitation et cela fait que la technique du tiltage des antennes relais est la plus utilisée [37]. Cette technique de tiltage permet d'optimiser les transmissions de puissance de la macrocellule vers les cellules de faible puissance de même que les terminaux mobiles, en plus de limiter les interférences vers les cellules adjacentes. L'utilisation des antennes adaptives et la technique coopérative de communication des systèmes distribués d'antennes adaptives [75] à combinaison de la technique du tiltage [16], [80] pour l'orientation des faisceaux hertziens permet de contrôler la puissance de transmission et les interférences des cellules adjacentes [15]. La configuration des antennes relais d'un nœud à type macrocellule est faite soit par entrée unique et sortie unique (SISO), ou entrées multiples et sorties multiples (MIMO). L'utilisation des antennes MIMO au nœud d'une station de base à type macrocellule permet d'économiser la consommation énergétique des systèmes de

communication de l'ordre de 40%, contre 60% par une intégration des cellules hétérogènes, et 20% pour les techniques d'endormissement [62].

L'évolution des technologies cellulaires avec les techniques de réductions de l'énergie [123] est présentée dans le Tableau 1.1. L'analyse du Tableau 1.1 montre que la fréquence des porteuses s'élève de plus en plus suivant que l'on monte en génération supérieure. Cette réalité est une réponse à la demande sans cesse croissante du trafic mais cela donne lieu à des cellules de petite taille.

Tableau 1. 1: L'évolution des technologies cellulaires

<b>Technologie</b>	<b>Fréquence</b>	<b>Densité de puissance (W/m<sup>2</sup>)</b>	<b>MS niveau de puissance</b>	<b>BS niveau de puissance</b>	<b>Méthodes d'optimisation de puissance</b>
1G	800 MHz	4,0	Faible	Elevé	Technique de modulations à lobe unique
2G	850/900/ 1800/ 1900 MHz	4,5-9,0	GSM 850/900 : 33 dBm GSM1800/1900 : 24-39 dBm	Macro : 46 dBm Micro BTS : 14- 32 dBm	Mode d'endormissement
3G	850/900/ 1800/ 1900/ 2100 MHz	4,5-10	21-33 dBm	24-38 dBm	Mode d'endormissement plus utilisation des relais
4G	1,8 GHz 2,6 GHz	10	23 dBm	43-48 dBm	Mode d'endormissement plus utilisation des relais , des cellules de petite taille
5G	30-300 GHz	10	Elevé	Elevé	Mode d'endormissement plus utilisation des relais , des cellules de petite taille, communication directe entre terminaux

### 1.3.1.5. Les systèmes de télécommunications à énergie verte

L'Institut des Standards Américain (ANSI) a défini le terme de 'Green Communication' comme l'ensemble des progrès réalisés au niveau du terminal, les protocoles, les politiques d'utilisation et d'allocation de fréquences. Les avantages de la communication verte ont conduit plusieurs consortiums à se pencher sur la question. Le groupe de travail *COST-Cooperative Radio Communications for Green Smart Environments* (COST-IC1004) qui avait pour but de déterminer les différents critères permettant de quantifier et de réduire la consommation d'un réseau et des terminaux, a proposé l'utilisation des relais et un rapprochement des stations de bases aux utilisateurs.

D'autres projets tels que *Optimising Power Efficiency in mobile RAdio Networks* (OPERANet), *Towards Real Energy-efficient Network Design* (TREND), *Cognitive Radio and Cooperative strategies for Power, saving in multi-standard wireless devices* (C2POWER), et *GreenTouch* s'étaient plus concentrés sur l'optimisation de la performance en efficacité spectrale, et le coût de déploiement du réseau [62], [56] avec une attention plus particulière pour l'ensemble du réseau. Des projets tels que *Energy Aware Radio and neTwork tecHnologies* (EARTH) étaient plus focalisés sur la couche physique et de la couche liaison avec des solutions applicables au niveau des composants, et du projet de l'agence nationale de la recherche française *Time Reversal MIMO OFDM green communicAtions based on micRo-structured ANtenna Arrays* (TRIMARAN). Le projet 'Toward Green Energy Efficient 5G Mobile Networks' (5GrEEen) est un projet collaboratif européen avec *Mobile and wireless communications Enablers for the Twenty-twenty Information Society* (METIS) dont le but est de définir les aspects énergétiques de la 5<sup>e</sup> Génération des systèmes de communication [21].

Ces projets formulent les critères d'un système de télécommunications à énergie verte qui sont illustrés sur la Figure 1.3.

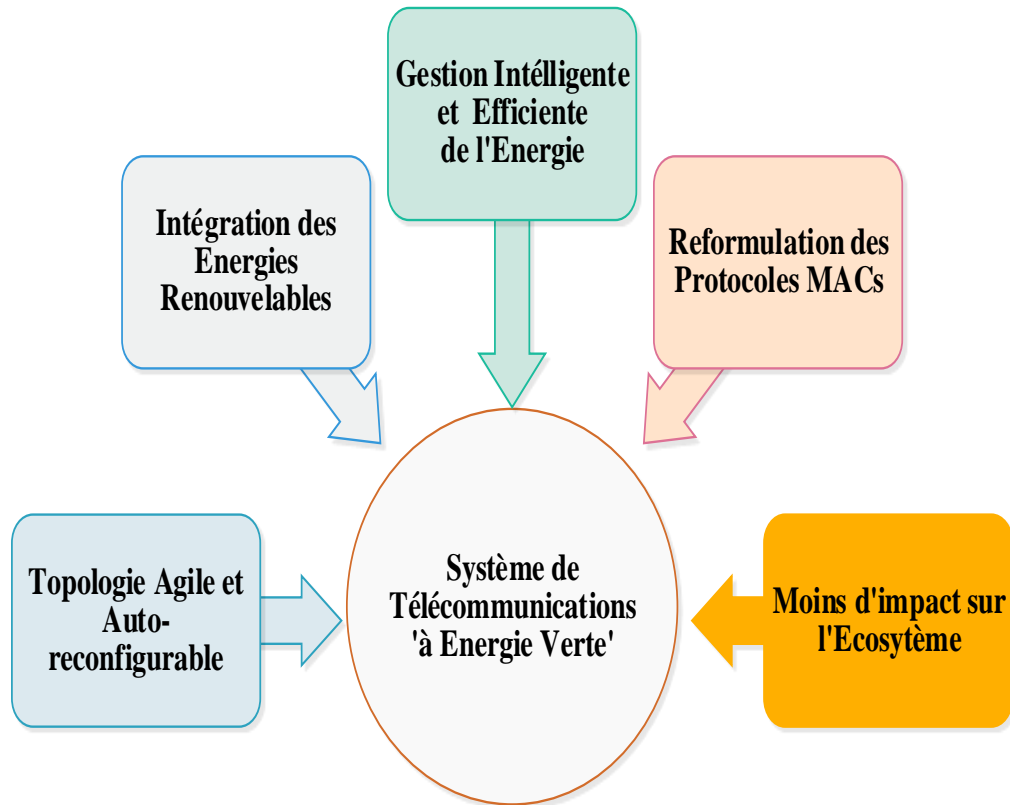


Figure 1. 3: Les attributs d'un système de télécommunications à énergie verte

La Figure 1.3, relève les attributs d'un système de télécommunications à énergie verte. Ces attributs concernent :

- la topologie doit être agile et auto-reconfigurable cela implique que les systèmes d'antenne radio doivent s'adapter à la demande du trafic ;
- la reformulation des protocoles de contrôle d'accès au médium (MACs) pour que les stations de base puissent recouvrer rapidement du mode veille au mode actif (transmission) à des fractions de secondes, cela doit procéder d'une gestion économique et efficace de l'énergie ;
- les systèmes de communication futurs doivent être à tolérance zéro à émission de gaz à effet de serre (GES<sup>o</sup>), soit doivent utiliser une alimentation d'énergie verte graduelle ou totale.

On peut noter plusieurs exemples d'utilisation des énergies renouvelables dans les réseaux de communications. Un système de communication verte dans un réseau cognitif où les nœuds de transmissions secondaires sont alimentés par une énergie



verte est présenté dans la référence [77]. L'utilisation de l'énergie hybride appliquée aux cellules de tailles petites est présentée à la référence [120], tandis que les travaux de la référence [62], portent sur les solutions architecturales de l'intégration des énergies vertes pour l'alimentation des nœuds de transmission dans une configuration hétérogène (des femto-, pico-, microcellules, autres que les macro-cellulaires). En Angleterre [29], un réseau à haut débit est alimenté à partir des sources d'énergie renouvelable hybride éolienne et photovoltaïque. En Allemagne [47], du matériel de communications cellulaires est déployé, et complètement alimenté par l'énergie photovoltaïque en vue de desservir les milieux enclavés qui n'étaient pas préalablement équipés d'infrastructures des télécommunications.

Précisément sur le réseau d'accès, une grande partie des études portent sur les réseaux sans-fil puisqu'ils représentent plus de 50% des émissions de gaz à effet de serre (GES) dans les systèmes des nouvelles technologies de l'information et de la communication (NTIC). Les nœuds dans les systèmes NTIC, une fois dotés des technologies de récolte d'énergie ont la capacité à réduire le GES par l'apport des énergies renouvelables [50]. C'est dans ce sens que l'utilisation de radio logicielle a été proposée pour réduire la consommation des relais matériels [83] dans l'optique d'obtenir un réseau de communication dit vert ou '*Green Communication*'.

### **1.3.2. Potentiels des énergies renouvelables au Togo**

Les sources énergétiques sont présentées dans la Figure 1.4. Une source d'énergie hybride (SEH) utilise en général au moins deux sources d'énergies électriques telles qu'une d'origine renouvelable et une autre thermique.

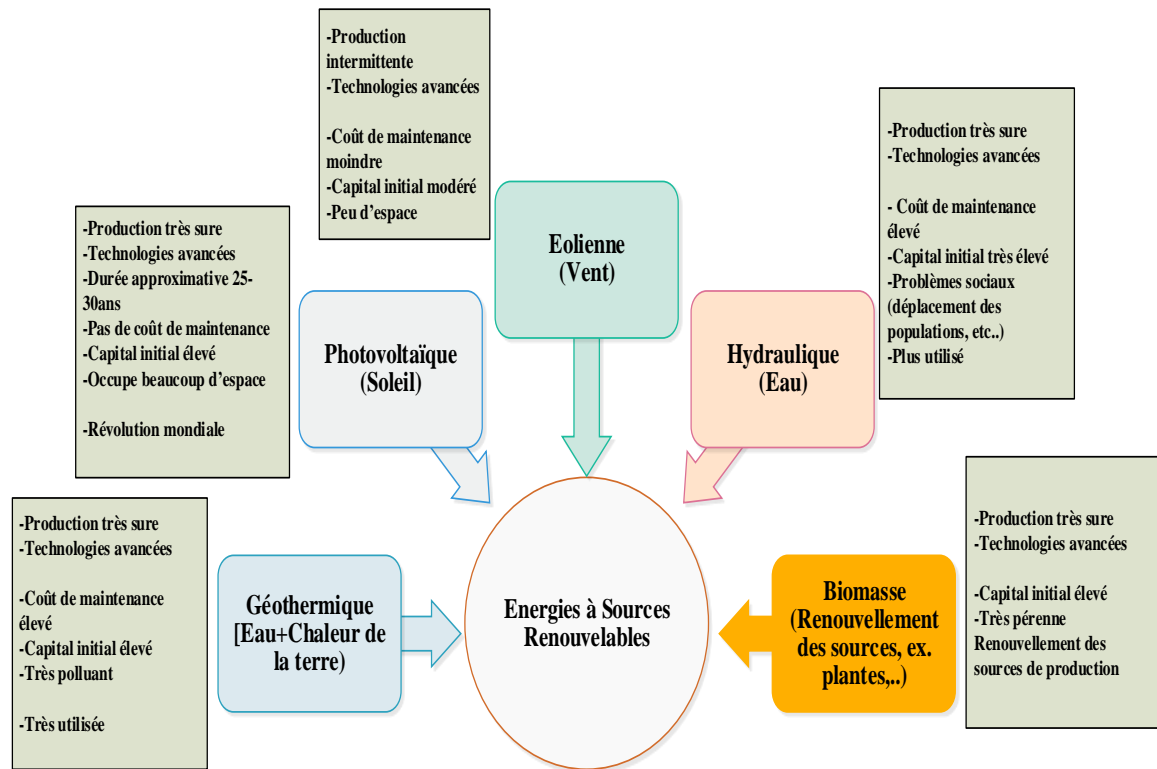


Figure 1. 4: Caractéristiques des énergies renouvelables

Les systèmes énergétiques hybrides (SEH) sont classés suivant la puissance fournie à la charge. Les SEH sont dits à faible puissance lorsque la puissance fournie est inférieure à 5 kW. Ceux-ci trouvent leur application dans les usages à systèmes autonomes tels que les stations de télécommunications, systèmes de pompage de l'eau, les systèmes isolés. Les SEH qui fournissent une puissance de 10-250 kW, sont dits à moyenne puissance. Ils sont utilisés dans les micro-réseaux isolés : alimentation d'un village isolé, d'un hameau, des zones rurales. Les SEH sont caractérisés de grande puissance si la puissance fournie à la charge est supérieure à 500 kW. Ceux-ci sont utilisés dans les grands réseaux isolés ou les réseaux insulaires.

La qualité de l'énergie d'un système énergétique hybride (SEH) est influencée par la stabilité de la tension, de la fréquence (produite) et sa fiabilité aux interruptions. La stabilité de la tension dépend des fluctuations variables, des effets harmoniques et des effets transitoires. Toutefois qu'il y a un intérêt vers la migration de l'utilisation des énergies photovoltaïques et éoliennes en Afrique

En effet, dans l'espace sub-sahélien, il a été identifié un potentiel éolien sur la façade atlantique (nord du Sénégal) avec des vents assez constants qui se situeraient

entre 8,5 à 10 m/s [106]. Le Cap Vert bénéficie de vents dominants venus de l'océan Atlantique et le pays utilise intensivement l'énergie éolienne dans sa consommation énergétique électrique grâce au projet Cape Verde Wind Power qui contribue à près d'un quart (25%) de sa production totale d'énergie [95]. Cette production est prévue de doublée en 2020 au regard des politiques transitoires en utilisation des énergies renouvelables (ER) mises en place dans le pays.

Pour le Togo, le potentiel énergétique éolien est à près de 20 MWh par an [62] et résiderait essentiellement sur la côte côtière alors qu'une macro-cellule consomme en moyenne 25 MWh. D'après la référence [114], qui a étudié le potentiel éolien de la ville de Lomé, la vitesse du vent varie entre 4 à 10 m/s et un modèle de prédiction de la quantité d'énergie éolienne récupérable a été établi. L'approche de la distribution hybride de Weibull a été utilisée dans cette étude à cause des vents calmes observés dans la série de mesures de vent sur le site. Dans la référence [111], les travaux se sont orientés vers la caractérisation et l'évaluation du potentiel éolien à des échelles annuelle et mensuelle du site de Lomé avec des collectes de vitesses du vent recueillies sur une période de deux ans à une hauteur de 10 mètres du sol indiquent que la vitesse moyenne annuelle est de 2,9 m/s. Ces études ont montré également que les mois de février, mars, avril, juillet, août et septembre présentent une vitesse moyenne mensuelle proche de 4 m/s. En plus il a été relevé que les aérogénérateurs de vitesses nominales faibles d'ordre de 6 m/s à 8 m/s sont les plus appropriés pour une exploitation optimale de l'énergie électrique d'origine éolienne sur le site de Lomé à partir d'une hauteur de 25 mètres du sol. Le gisement éolien ne serait pas vital en production énergétique électrique pour le Togo. Cependant une hybridation en production d'énergie particulièrement avec les ressources solaires serait possible et plus viable. La région centrale et le grand nord du Togo sont principalement hors réseau avec très peu de petits sites hydroélectriques. Dans ces zones, le Togo a une exposition au rayonnement solaire qui varie entre 5,2 et 5,6 kWh / m<sup>2</sup> / jour. Il faut noter que l'hydroélectrique produit un total de 72 MW d'énergie tandis que les centrales thermiques fournissent une puissance totale de 186 MW. La puissance en énergie solaire installée est de l'ordre totale de 50 MW en 2016 [11]. Les statistiques des énergies utilisées sur le réseau national électrique [27] sont données dans le Tableau 1.2.

Tableau 1. 2 Les sources de production électrique disponible au Togo

Les centrales électriques de production	Les sources	Puissance électrique disponible [MW]	%
<b>Hydroélectrique</b>			
Centrale de Kpimé	Eau	1,6	0,29
Centrale de Nangbéto	Eau	65,5	11,74
<b>Total partiel</b>		<b>67,1</b>	<b>12,02</b>
<b>Thermique</b>			
Centrale de Kara	Fossile	3,5	0,63
Centrale de Sokodé	Fossile	0,6	0,11
Centrale Sulzer	Fossile	12,5	2,24
Centrale de Lomé B	Fossile, fioul	10	1,79
Centrale N1 de Contour-Global	Fossile, fioul	100	17,92
Centrale N2 Contour-Global	Gaz naturel liquéfié	60	10,75
<b>Total partiel</b>		<b>186,6</b>	<b>33,44</b>
<b>Les auto-producteurs</b>		<b>24</b>	<b>4,30</b>
Solaire	soleil	0,35	0,06
Eolienne	vent	20	3,58
<b>Total partiel</b>		<b>20,35</b>	<b>3,65</b>
<b>Energie importée</b>			
Transmission Company of Nigeria (TNC)	-	200	35,84
Volta River Authority, Ghana (VRA)	-	60	10,75
<b>Total partiel</b>		<b>260</b>	<b>46,59</b>
<b>Total</b>		<b>558,05</b>	<b>100,00</b>

### 1.3.3. Les dispositifs de stockage de l'énergie électrique

Le stockage de l'énergie est un point critique de l'utilisation des énergies renouvelables. Il peut être réalisé en utilisant des systèmes spécifiques appropriés à la technologie de production. Pour l'hydroélectricité, par exemple, un stockage d'énergie hydraulique pompé, un stockage d'électricité à échelle commerciale acceptable sera approprié. Pour les générateurs solaires et thermiques, les batteries rechargeables, ou les ultra-batteries ou encore des super-condensateurs peuvent être utilisés [3]. Il faut relever que, l'Agence de Développement de l'Energie et de la Maitrise de l'Environnement (ADEME) a identifié quatre méthodes de stockage de l'énergie : mécanique, électrochimique et électrostatique, thermique et thermochimique, et chimique. Toutefois, suivant l'utilisation de l'énergie produite, les procédés de stockage sont distingués en deux types : direct et indirect. Pour un stockage direct, cela consistera à l'utilisation de super-condensateurs sans réduction d'énergie [116], mais cette technique est coûteuse. Par ailleurs, l'usage de grands condensateurs reste limité du fait de la capacité de stockage, et du coût qui ne permettent pas d'envisager leur exploitation à grande échelle, toutefois ils sont convenables pour les systèmes de télécommunications. Le stockage indirect comprend les techniques par voie chimique, y compris des super-condensateurs. Dans ce processus, les batteries se chargent et se déchargent au gré des besoins. En considérant par exemple une molécule d'eau pour en récupérer l'hydrogène (procédé analogue à l'électrolyse de l'eau) ensuite réinjecté dans les piles à combustible restituant une énergie électrique. Le risque est que cette technique génère du dioxyde de carbone, donc reste polluante. Cette voie fait l'objet de nombreuses recherches notamment dans les technologies lithium-ion.

Il y a aussi la méthode par création d'un potentiel gravitationnel (le stockage gravitaire de pompage), en faisant remonter de l'eau dans un barrage. Ensuite, grâce à des pompes actionnées électriquement qui peuvent relâcher l'eau au travers de turbines génératrices. Ces installations sont dites de stations de transfert d'énergie par pompage (STEP) qui consistent à stocker une grande quantité d'électricité. Cependant, cette méthode demande l'existence d'une centrale hydroélectrique.

Les condensateurs sont aussi utilisés comme les éléments de protection contre les accroissements de tension dans les convertisseurs statiques. Les inductances sont utilisées pour la protection contre les accroissements du courant. L'utilisation des convertisseurs statiques de compensation 'STATCOM, permettent de produire de la puissance réactive.

### **1.3.4. Les stratégies de l'implémentation du l'accès universel à l'électricité et des données**

Cette section présente le niveau d'accès à l'électricité et aux données avec un trait particulier sur le cas du Togo.

#### **1.3.4.1. Le niveau de l'accès universel à l'électricité et des données**

La politique du service d'accès universel de l'union internationale des télécommunications (UIT), stipule un niveau acquis des services de communications en données et en activité vocale disponibles, accessibles et abordables à toutes les bourses [71]. L'étude des statistiques sur l'implémentation de la technologie des compteurs électriques intelligents à partir du GSM [14], indique que le taux d'accès à l'internet reste très faible au Togo par rapport aux pays de la sous-région. Selon, l'UIT, l'utilisation des ordinateurs et la pénétration de l'internet par foyer sont respectivement de 5,2 et 2,6% au Togo. Au Togo, il y a 4.657.321 abonnés mobiles environs sur les 7 millions d'habitants et 3 opérateurs de téléphonie mobile (Togocel et Togotélécom, sont étatiques ; et Moov, l'opérateur de la téléphonie mobile privée). Le Togo présente un taux de pénétration à la téléphonie mobile de 66,78%. De même, 250575 togolais disposaient d'un téléphone fixe avec à la clé 66000 abonnés à internet "haut débit" fixe. Pour l'internet mobile "haut débit", ils étaient 431000 abonnés au regard des statistiques publiés en mai 2016 [52]. En ce 25 novembre 2019 selon l'ex-PDG de Togocom à

Afreepress, Togocom disposait de 4,1 millions d'abonnés mobiles, 2,7 millions d'abonnés de data, 34000 lignes pour la voix et 17000 lignes pour la data.

Au Togo, la consommation énergétique sur un réseau cellulaire est à près de 344 kWh/m<sup>2</sup> en moyenne mensuelle avec un coût de 147 FCFA/kWh sur l'énergie thermique sur le réseau cellulaire de l'opérateur en téléphonie mobile d'Atlantique Télécom. Par contre, le taux de pénétration des réseaux mobiles au Togo, est estimé à plus de 90% alors que celle du réseau de distribution électrique est à près de 31,38% en moyenne et seulement de 7% en zones rurales [27]. Dans les pays subsahariens, et précisément au Togo, les services de la voix et de données d'autre part, ont un taux également très mitigé avec le nombre d'utilisateurs de la téléphonie mobile. L'implémentation du service accès universel aux données et au service vocal par un déploiement des technologies mixtes a fait l'objet d'une étude sur le cas du Tchad. Par ailleurs, l'Afrique comptait près de 138 millions d'utilisateurs de téléphone portable en 2015 et malheureusement sans infrastructures d'électricité adéquates. Dans la référence [13], il a été de même fait cas d'un faible taux d'électrification dans les régions de l'Afrique Centrale, estimé dans l'ordre de 13%, par ailleurs, et l'Afrique sub-saharienne présentait un taux d'électrification de 7% en milieu rural [99]. On notait déjà, en 2009 qu'il y en avait dans le monde, malheureusement 1,1 milliard de personnes sans électricité [46]. Les pays industrialisés avaient établi une feuille de route pour l'électricité à accès universel pour tous à un taux de 100% à l'horizon de 2030 par l'intégration des énergies renouvelables dans la consommation [39]. C'est dans ce contexte que l'Agence Internationale de l'Energie (IEA) [66], avait estimé le taux de l'énergie solaire à environ 11% de l'énergie globale produite d'ici- l'an 2050. Dans le même sens, la vision mondiale énergétique en 2100, pilotée par le conseil allemand sur le changement climatique global (GACGC), prévoyait que l'énergie solaire contribuerait à près de 20% en 2050, et de 60% en 2100 de l'énergie mondiale produite [128]. La production électrique requise pour le niveau d'accès universel à l'électricité à l'horizon 2030 de l'Afrique sub-sahara (voir Tableau 1.2) est à près de 462 TWh [66].

Tableau 1. 3: Requis en génération électrique à l'électricité access-universel à l'horizon 2030

	Sur réseau	Mini-Réseau	Site Isolé ( Hors réseau)	Total
<b>Afrique</b> Sub-Sahara	195	187	80	462
Afrique	196	187	80	463
Chine	1	1	0	2
Inde	85	112	48	245
Reste de l'Asie	87	94	40	221
<b>Asie Emergente</b>	173	206	88	468
Amerique Latine	6	3	1	10
Les pays émergents	379	399	171	949
Le monde	380	400	172	952

Dans une politique d'une expansion de l'accès universel à l'électricité il ne faut pas s'en tenir à des méthodes classiques qui sont limitées. L'utilisation des méthodes classiques doit prendre en compte au plan national, la connaissance du taux d'électrification par catégories des usagers. Une procédure de visite du terrain [97], [51] et le coût d'investissement par rapport au choix de la forme d'énergie [30] sont appréciables. C'est dans ce but que l'électrification rurale à déploiement de sources hybrides est proposée dans les références [46], et [100]. A la référence [17], l'intégration des énergies renouvelables à cellule photovoltaïque (solaire) en plus du stockage électrochimique à batterie sont considérés à titre de compensation afin d'éliminer les effets harmoniques. Il faut relever que les résultats des recherches sur la disponibilité du soleil [94] sont très mitigés dans la sous-région Ouest-Africaine et dans le monde en général.

#### 1.3.4.2. Approches d'implémentation de l'accès universel aux services de voix et données

L'indice de l'accès universel aux services voix et données, indique le niveau acquis des objectifs des deux services principaux que sont le service voix et le service de données [71]. Elle pourra être atteinte par le partage des infrastructures entre opérateurs, la maintenance et l'appui aux infrastructures à large bande



partiellement supportée par l'autorité, la mise en place d'un système d'itinérance locale pour les zones blanches, comme cas fait en France, et au Canada. Au Sénégal, la mise en œuvre du fonds de développement, et la libéralisation du secteur des télécommunications ont contribué à optimiser le développement du numérique en milieu rural [13].

Dans l'extension du service-accès universel, les technologies telles que, le Worldwide Interoperability Microwave Access (WiMAX), 802.16.x, [26] et le Wireless Fidelity (WiFi), 802.11.x peuvent être utilisées. Ces technologies de données sans fil sont relativement moins chères en terme du capital d'investissement CAPEX et du coût opérationnel de maintenance OPEX. Elles offrent de données à haut débit de base. Elles sont aussi déployées dans les milieux à faibles ou fortes densités, où le déploiement des infrastructures semble difficile. Il est recommandé que le fixe WiMAX et la fibre optique soient utilisés dans les zones de fortes de densité. Il est à noter que le coût de la fibre optique est également très cher, et donc les opérateurs peuvent utiliser le WiMAX pour répondre à la demande de donnée à haut débit de base. En milieu rural, ou milieu à faible densité, une combinaison du fixe WiMAX et de la technologie *Asymmetric Digital Subscriber Line* (ADSL) est souhaitable. En plus, le WiMAX-Mobile, est une autre opportunité qui offre un service de données en plus du service de voix. Par contre, le Wi-Fi, offre de l'internet à haut débit basique et de la voix sur Internet Protocol (IP), mais requiert la connexion d'un réseau local à internet. Elle est la plus répandue. Il est possible de combiner les technologies telles que le Wireless-Fidelity (Wi-Fi), et des terminaux à très petite ouverture '*Very Small Aperture Terminals, VSAT*' [70], [88]. La technologie VSAT permet de fournir les services de données et de voix aux populations isolées sans infrastructures existantes, mais son coût est très cher en terme d'exploitation. Toutefois, elle reste indiquée dans les limites des besoins d'accès et service universel. Il faut aussi relever que l'exploitation des espaces blanches des canaux de télévisions (TV) en ultra-haute fréquence en 470-790 Mhz reste une opportunité pour offrir des données à des lieux enclavés par le déploiement du super-WiFi qui utilise les antennes Yagi comme émetteur radio [25], [64]. La technologie sans fil du super Wi-Fi utilise les fréquences TV qui sont

laissées vacantes entre les couches de radiodiffusion dénommées "espaces blancs" après le passage au numérique ou une porteuse du réseau de la Télévision Numérique Terrestre (TNT) déjà installé. Cette technologie reste bénéfique pour connecter les entreprises et les ménages qui ne bénéficient pas d'une qualité de service en abonnement à des lignes dédiées. Elle dispose d'un rayon de couverture 100 km. Des débits de 10 Mbps peuvent être atteints, alors que la technologie du WiMAX est limité 3 à 5 Mbps. De même, le Light-Fidelity (Li-Fi), qui est une technologie reposant sur l'utilisation des ampoules de type diode électroluminescente dont le débit internet peut atteindre en moyenne 1Gbps, est une autre opportunité pouvant répondre au besoin de l'accès universel en donnée et en électricité dans une politique nationale.

#### **1.4. Quantification de l'énergie verte de la vitesse du vent et de l'irradiation solaire**

Cette section présente les grandeurs liées à la production de l'énergie électrique à partir du vent et du soleil.

##### **1.4.1. Quantification de la vitesse du vent et de l'irradiation solaire**

La théorie de la production électrique à partir des sources renouvelables est essentielle à la compréhension de la quantification au regard des conditions climatiques dans l'espace et le temps.

###### **1.4.1.1. La relation entre la vitesse et de la hauteur**

La quantification de l'énergie éolienne du vent est dépendante de la réserve énergétique solaire convertie. L'énergie dépendante du vent est estimée à 2% (soit  $3,6 \times 10^9$  MW) de la réserve énergétique solaire convertie à près de  $1,8 \times 10^{11}$  MW. Toutefois, 35% de l'énergie éolienne est dissipée à moins de 1000 m de la surface

terrestre. En conséquence, l'énergie éolienne disponible qui peut être récoltée en d'autres formes d'énergie est environ  $1,26 \times 10^9$  MW, soit 20 fois le taux de consommation d'énergie mondiale actuelle. L'énergie éolienne provient de l'énergie cinétique du vent qui est fonction de la masse,  $m$  et la vitesse  $V$ . La densité du vent,  $d$ , est déterminée par rapport à la surface de leur rotor de balayage  $A$ ; la masse volumique de l'air  $\rho$  et est donnée par la relation (1.1)

$$d = V \times A \times \rho. \quad (1.1)$$

L'équation (1.2) par contre exprime la vitesse du vent  $V$  en fonction de la hauteur du support  $H$ , et à une hauteur de référence prédéterminée,  $H_{ref}$  telle que :

$$V = V_{ref} \left( \frac{H}{H_{ref}} \right)^\alpha \quad (1.2)$$

où  $V_{ref}$  est la vitesse du vent correspondante et  $\alpha$  est un facteur de correction relatif aux obstacles par rapport au sol, à la densité de l'air et de la stabilité du vent. Une valeur de  $1/7$  ou  $0,142$  est généralement utilisée [47]. Celui-ci dépend en effet de la vitesse du vent ; de la surface couverte par les pâles; de la masse de l'air. En liant, les formules (1.1) et (1.2), l'expression de la puissance disponible  $\bar{P}_{Disp}$ , par mètre carré ou unité de surface peut-être exprimée par l'Equation (1.3)

$$\bar{P}_{Disp} = \frac{1}{2} \rho \bar{V}^3. \quad (1.3)$$

L'équation (1.3) décrit une puissance par unité de surface où  $\rho$  est la masse volumique de l'air et  $\bar{V}^3$  est le moment d'ordre 3 en relation (1.4)

$$\bar{V}^3 = \int_0^{\infty} V^3 f(V) dV. \quad (1.4)$$

Des équations (1.3) et (1.4), l'énergie éolienne à un endroit est une fonction cubique de la vitesse du vent. La densité de puissance pour les séries de temps des données de vitesse du vent réel est calculée [45] [117] par l'Equation (1.5)

$$P_{recup} = C_p \frac{1}{2} \rho \cdot A \cdot V^3 = C_p \cdot \bar{P}_{Disp} \quad (1.5)$$

où  $C_p$  est le coefficient de puissance qui est déterminé à partir d'un traitement statistique des données brutes du vent et le calcul des fréquences à un seuil donné de la vitesse.

### 1.4.1.2. Quantification des paramètres de la distribution de Weibull

L'évanouissement du signal à court terme par rapport à la longueur d'onde est estimé par la fonction de probabilité de distribution de Weibull [114], [117]. Cette distribution comporte deux paramètres significatifs, donnée par l'Equation (1.6)

$$f(v) = \left(\frac{k}{c}\right) \left(\frac{v}{c}\right)^{k-1} \exp\left(-\left(\frac{v}{c}\right)^k\right) \quad (1.6)$$

où  $v$  est la vitesse (m/s) du vent ;  $k$  est le facteur de forme de la largeur de la distribution de la vitesse du vent qui illustre le pic de distribution du vent de toute région ;  $c$  est le facteur d'échelle (m/s) ; qui indique la façon dont l'emplacement est venteux, et définie de même l'échelle des abscisses de la distribution du vent. La fonction cumulative peut être obtenue en calculant l'intégrale de la fonction de densité de probabilité avec plusieurs méthodes d'estimation des paramètres  $c$ , et  $k$  [117]. Dans la méthode empirique de Justus les paramètres  $k$  et  $c$  sont calculés par l'Equation (1.7)

$$\begin{cases} k = (\rho/(\bar{v}))^{-1,086} \\ c = \frac{\bar{v}}{\Gamma(1 + \frac{1}{k})} \end{cases} \quad (1.7)$$

et la méthode empirique de Lysen emprunte le calcul de  $k$  par la méthode de Justus où le paramètre  $c$  est exprimé par l'Equation (1.8)

$$c = \bar{v} \left(0,586 + \frac{0,433}{k}\right)^{-1/k} \quad (1.8)$$

Il y a d'autres méthodes telles que la méthode du facteur d'énergie qui consiste à calculer les paramètres  $k$  et  $c$  en fonction du facteur de forme d'énergie ( $E_{pf}$ ) qui est un paramètre utilisé pour la conception aérodynamique des turbines. Le facteur de forme d'énergie  $E_{pf}$  est obtenu par la relation (1.9)

$$E_{pf} = \frac{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n v_i^3}{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n v_i} = \frac{\overline{v^3}}{\bar{v}^3} = \frac{\Gamma(1 + \frac{3}{k})}{\Gamma^3(1 + \frac{1}{k})} \quad (1.9)$$

où  $\overline{v^3}$  est la moyenne du cube de la vitesse du vent ; et  $\bar{v}^3$  le cube de la moyenne de la vitesse. Les paramètres  $k$  et  $c$  sont calculés par l'Equation (1.10) :

$$\begin{cases} k = 1 + \frac{3,69}{E_{pf}^2} \\ c = \frac{\bar{v}}{\Gamma\left(1 + \frac{1}{k}\right)} \end{cases} \quad (1.10)$$

Le paramètre  $c$  est également calculé de la même manière qu'à la méthode empirique de Justus [117]. En outre la méthode du maximum de vraisemblance prend en compte les itérations numériques étendues afin de déterminer les paramètres  $k$  et  $c$  de la fonction de Weibull par l'Equation (1.11)

$$\begin{cases} k = \left[ \frac{\sum_{i=1}^n v_i^k \ln(v_i)}{\sum_{i=1}^n v_i^k} - \frac{\sum_{i=1}^n \ln(v_i)}{n} \right]^{-1} \\ c = \left[ \frac{\sum_{i=1}^n v_i^k}{n} \right]^{1/k} \end{cases} \quad (1.11)$$

où  $v_i$  est la vitesse du vent à l'instant  $i$  (m/s) ; et  $n$  est le nombre de points de données de vitesse de vent non nulle. Puis la méthode marocaine [117] détermine les paramètres  $k$  et  $c$  respectivement par la relation (1.12)

$$\begin{cases} k = 1 + (0,453 \times (\bar{v} - 2))^{0,51} \\ c = \frac{\bar{v}}{\Gamma\left(1 + \frac{1}{k}\right)} \end{cases} \quad (1.12)$$

### 1.4.1.3. Les technologies éoliennes

Les technologies éoliennes sont classées en fonction de deux critères principaux qui sont la méthode de régulation appliquée à la turbine et la nature de la machine utilisée pour transformer l'énergie mécanique en énergie électrique. La régulation est soit faite par décrochage aérodynamique des pales, ou bien par angle de calage variable. Les machines électriques sont les machines asynchrones à cage (les éoliennes à vitesse fixe), à double alimentation (les éoliennes à vitesse variables) ; et synchrones dans le cas des éoliennes à vitesses variables.

Cependant, les éoliennes pour les petits systèmes électriques isolés constituent une solution pour produire de l'électricité à basse tension dans des endroits isolés. Ces générateurs ont une puissance généralement inférieure à 10 kW, au regard de cela, ils sont utilisés dans les maisons, sur des bateaux à voiles ou pour les relais de télécommunications.

### **1.4.2. Quantification de l'énergie photovoltaïque (photopile)**

Cette section décrit la théorie et les technologies pour l'estimation de l'énergie photovoltaïque.

#### **1.4.2.1. Le potentiel photovoltaïque**

L'ensoleillement ou insolation est la mesure du rayonnement solaire reçue par une surface au cours d'une période donnée. La mesure de l'insolation s'exprime en mégajoule par mètre carré ( $\text{Mj/m}^2$ ) ou en Watt-heure par mètre carré ( $\text{Wh/m}^2$ ). En effet, la quantité d'énergie générée par le soleil est immense. Cette production d'électricité devrait se poursuivre pendant encore dix milliards d'années. Même avec les pertes atmosphériques, la quantité totale d'énergie solaire atteignant la surface de la Terre est d'environ 10000 fois la consommation totale d'énergie de l'ensemble de la population mondiale (estimée environ à 15 TW) [109]. La quantité d'énergie solaire qui arrive à la terre est approximativement  $180 \cdot 10^6$  GWh. La couche terrestre reçoit une quantité d'énergie importante, au regard de cette proportion, l'énergie solaire est dite de source alternative aux autres sources d'énergie. Chaque année, ce sont 1.070.000 pétawatts-heures (PWh, soit  $10^{15}$  Wh) que la Terre reçoit, soit plus de 8.000 fois la consommation énergétique mondiale annuelle estimée à 133 PWh en 2005. En 2016, au niveau mondial, la production d'électricité solaire photovoltaïque atteignait 375 TWh, soit 1,8% de la production totale d'électricité.

L'énergie photovoltaïque est reconnue comme une opportunité mondiale par la Conférence de Paris (COP) sur les changements climatiques de 2015 (COP21).

La coalition chargée de coordonner les politiques de développement du solaire thermique et photovoltaïque, l'Alliance Solaire Internationale (ASI) a été lancée en novembre 2015. C'est dans cette logique que la COP24 tenue en décembre 2018, visait l'application des recommandations de l'accord de Paris sur le réchauffement climatique afin de limiter l'augmentation de la température à 2° d'ici à l'an 2100 comme il a été prédit par le groupe d'expert intergouvernemental sur les changements climatiques (IPCC).

Au Togo, l'énergie solaire globale moyenne rayonnée est estimée à 4,4kWh/m<sup>2</sup>/j, 4,3kWh/m<sup>2</sup>/j, et 4,5kWh/m<sup>2</sup>/j, pour les villes de Lomé, d'Atakpamé et de Mango, respectivement. Il est à noter que les puissances dépassent parfois 700W/cm<sup>2</sup> soit 0,7kW/m<sup>2</sup>, en ciel dégagé, particulièrement en saison sèche selon les statistiques fournies. La puissance en énergie solaire installée est de l'ordre 301,92kWc en 2015 et de 50 MW en 2016 [11].

#### 1.4.2.2. La puissance photovoltaïque

Cette puissance dépend considérablement de l'espace et du temps. La puissance photovoltaïque reçue par une surface est fonction de l'irradiation globale et de la durée de l'ensoleillement (insolation). La durée d'insolation correspond à la durée pendant laquelle le rayonnement solaire direct reçu sur un plan normal dépasse un seuil fixé par convention à 120 W.m<sup>-2</sup>. En l'absence de nuages, la durée d'insolation est pratiquement égale à la durée du jour, qui s'appelle aussi durée astronomique ou théorique du jour  $S_0(h)$  [109]. Elle est définie par la relation (1.13)

$$S_0 = \frac{2}{15} \omega_0 \quad (1.13)$$

où  $\omega_0$  est l'angle horaire au coucher de soleil mesuré en degré (°) qui dépend de la latitude du lieu  $\varphi$  et de l'angle de déclinaison  $\delta$ .

L'irradiation globale horaire horizontale  $G$ , reçue par une surface est fonction de l'irradiation directe horaire horizontale  $G_b$ , et l'irradiation diffuse horaire horizontale,  $G_d$  définie par l'Equation (1.14)

$$G = G_b + G_d \quad (1.14)$$

Cependant, l'irradiation globale totale  $G_\beta$ , reçue sur une surface inclinée à un angle  $\beta$  pour une heure est exprimée par l'Equation (1.15) :

$$G_\beta = G_{b,\beta} + G_{d,\beta} + G_{r,\beta} \quad (1.15)$$

où

$G_{b,\beta}$ : la radiation solaire directe sur un plan incliné d'un angle  $\beta$  ;

$G_{d,\beta}$  : la radiation diffuse du ciel sur un plan incliné d'un angle  $\beta$  ;

$G_{r,\beta}$  : la radiation diffuse réfléchiée par le sol sur un plan incliné d'un angle  $\beta$ .

La puissance à la sortie ( $P_p$ ) d'une cellule photovoltaïque dans les conditions normales de mesures ou les conditions standard de températures (STC) telles que la sensibilité maximale de la cellule  $G_{ref} = 1000W/m^2$  [109], à la température de référence  $T_{ref} = 25^\circ C$  est donnée comme suit dans l'Equation (1.16) :

$$P_p = \eta_g \times A \times G_{ref} \quad (1.16)$$

avec  $P_p$  : la puissance de sortie (W),

$\eta_g$  : le rendement de la cellule à une température de référence,

$A$  : la surface de rayonnement,

$G_{ref}$  : l'insolation à un point référentiel.

L'énergie journalière  $E_d$  est donnée par l'Equation (1.17)

$$E_d = \eta_{PV} \times A \times G_d \quad (1.17)$$

avec  $\eta_{PV}$  le rendement journalier de la cellule en exploitation,  $G_d$  le rayonnement journalier du module photovoltaïque ( $Wh/m^2$  /j). Le rendement  $\eta_{PV}$  est calculé comme suit par l'Equation (1.18) :



$$\eta_{PV} = F_m \times [1 - \gamma \times (T_c - T_{ref}) \times \eta_g] \quad (1.18)$$

où  $\gamma$  le coefficient de température de la cellule, pour le monocristalline de silicium,  $\gamma = [0,004 - 0,005/^\circ C]$ , et le polycristalline  $\gamma = [0,001 - 0,002/^\circ C]$ ,  $F_m$  le facteur de remplissage.

De façon simplifiée, le rendement correspond au rapport entre la puissance fournie et la puissance reçue par une cellule photovoltaïque. Le rendement maximal  $\eta$  d'une cellule PV est également défini par l'Equation (1.19) :

$$\eta_{PV_{max}} = \frac{P_C}{E \cdot A} \quad (1.19)$$

où  $P_C$  est la puissance crête (W), l'éclairement  $E$  en  $W/m^2$ , et la surface  $A$  en  $m^2$ .

L'énergie produite  $E_{PV}$  par le panneau solaire est donnée par l'Equation (1.20) :

$$E_{PV} = P_C * G_\beta * k \quad (1.20)$$

avec l'indice de clarté,  $k \in [0,3; 0,85]$ , la puissance crête du panneau  $P_C$  en kWc,  $G_\beta$  est l'irradiation totale reçue par le panneau solaire en kWh/m<sup>2</sup>/jour.

La surface totale occupée  $s_t$ , par les panneaux photovoltaïques s'obtient à l'aide des caractéristiques dimensionnelles du panneau choisi. En tenant compte de l'espace entre les panneaux pour des raisons d'aération, de maintenance ou pour toute autre éventualité, on inclue la constante dite d'aération,  $k_a$ . C'est ainsi que la surface totale  $s_t$  du champ photovoltaïque est alors donnée par l'Equation (1.21) :

$$s_t = k_a \times N_{pt} \times L \times l \quad (1.21)$$

où  $S_t$  est la surface totale du champ photovoltaïque,  $k_a$  la constante liée à l'aération est égale à 1,1 ;  $L$  est la longueur du panneau solaire ;  $l$  est la largeur du panneau du solaire, et  $N_{pt}$  le nombre total des panneaux. La capacité de stockage des batteries se détermine par l'Equation (1.22) :

$$C = \frac{P_p \times n}{Dod \times e} \quad (1.22)$$

avec la capacité de stockage  $C$  en (Wh) ; le nombre de jours d'autonomie  $n$ ; la production quotidienne de la batterie  $P$  en (Wh) ; le niveau de décharge maximale  $Dod$  ; et l'efficacité de la décharge  $e$ . En plus, d'après l'Agence Internationale de l'Energie Atomique (AIEA), pour calculer la puissance totale des

récepteurs AC, il faut multiplier la puissance installée par le coefficient 1,5 [60]. La conception et le dimensionnement d'un générateur photovoltaïque est assez complexe à cause des nombreux paramètres à prendre en compte [41].

### 1.4.3. Technologies des systèmes photovoltaïques

Il existe trois types de technologies des systèmes photovoltaïques qui sont à cellule polycristalline, cellule monocristalline et cellule amorphe. Ces technologies sont résumées dans le Tableau 1.4.

Tableau 1. 4: Technologies de cellule photovoltaïque

Caractéristiques	Cellule polycristalline	Cellule monocristalline	Cellule amorphe
Puissance :	100 Wc/m <sup>2</sup>	100 à 150 Wc/m <sup>2</sup>	50 Wc/m <sup>2</sup>
Rendement :	11 à 15 %	14 % à 20 %	5% à 9%
Durée de vie :	20 à 30 ans	20 à 30 ans	20 ans

### 1.4.3. L'intégration des systèmes d'énergies hybrides par l'utilisation des logiciels

Cette section explore les logiciels utilisés dans l'utilisation des sources hybrides d'énergie électrique.

Lors de l'association de plusieurs sources énergétiques hybrides (SEH), des états d'instabilités peuvent être relevés [127]. Au regard de ces constatations, de nombreuses techniques d'optimisation sont utilisées pour la conception d'un système énergétique hybride tels que la méthode de construction graphique, la méthode de la programmation linéaire, l'algorithme génétique etc. Ces méthodes sont généralement intégrées dans plusieurs logiciels de dimensionnement et de simulation des SEH pour la viabilité du projet de l'association à des sources hybrides.

Le logiciel HOMER-Pro est conçu par l'organisation commerciale HOMER Energy. C'est un logiciel d'analyse, de simulation, de dimensionnement et d'optimisation des systèmes de génération électrique à base de sources énergétiques renouvelables. Le logiciel HOMER Pro, ou HOMER, simplifie l'évaluation de la conception de différents systèmes d'alimentation électrique qu'ils soient hors-réseau ou reliés au réseau, pour des applications variées comme l'électrification d'un site isolé. Le logiciel *Simulation and Optimisation Model for renewable Energy Systems* (SOMES), permet de simuler et d'analyser le fonctionnement d'un système hybride photovoltaïque-éolien-diésel avec stockage par batteries. La simulation est faite avec un pas de calcul d'une heure et le fonctionnement du système est évalué techniquement et économiquement.

Le logiciel *improved Hybrid Optimization by Genetic Algorithms (iHOGA)* est développé pour la simulation et l'optimisation des systèmes hybrides d'énergies renouvelables, connu sous le nom optimisation hybride par l'algorithme génétique (HOGA).

Le logiciel RETScreen est un outil d'analyse de projets d'énergies propres basé sur Microsoft Excel. Il a été élaboré par le Centre International d'aide à la décision sur les énergies propres affilié au Ministère de Ressources Naturelles du Canada. Il sert à aider les décideurs à déterminer rapidement si un projet d'énergie renouvelable, d'efficacité énergétique et de cogénération est financièrement et techniquement viable.

Le logiciel de planification *Long Range Energy Alternatives Planning*, (LEAP), est un système de planification des énergies de remplacement à long terme. C'est un outil logiciel pour l'analyse de la politique énergétique et de l'évaluation de l'impact du changement climatique. Il inclut un gestionnaire de scénario qui peut être utilisé pour décrire les mesures individuelles à prendre. LEAP n'est pas un modèle d'un système énergétique particulier, mais plutôt un outil qui peut être utilisé pour créer des modèles de différents systèmes énergétiques, où chacun nécessite ses propres structures de données uniques. LEAP fournit une gamme de méthodes assez étendue, lui permettant de modéliser la production et la planification de l'expansion du secteur électrique.

Le logiciel d'application *Model for Energy Supply Strategy Alternatives and their General Environmental Impact* (MESSAGE) est un modèle d'optimisation de l'ingénierie des systèmes utilisés pour la planification des systèmes énergétiques à moyen et à long terme, l'analyse des politiques de changement climatique, et l'élaboration de scénarii régionaux ou nationaux.

Le logiciel *Remote Area Power Supply Simulator* (RAPSIM) est utilisé dans l'étude des systèmes hybrides PV-éolien-diésel. Ce logiciel a été développé dans le cadre d'un projet financé par l'*Australian Research Cooperative Centre for Renewable Energy* (ACRE) qui est un centre de recherche sur les énergies renouvelables. Pour les systèmes utilisant uniquement une seule source d'énergie renouvelable, l'environnement '*Photovoltaic System*' (PVSyst) peuvent être utilisés. Le logiciel PVSyst requiert moins d'informations géographiques du lieu d'étude [105], et est utilisé pour quantifier et dimensionner l'énergie photovoltaïque à un site, soit isolé ou couplé à un réseau électrique. Un résumé de ces logiciels et leur domaine d'application est donné dans le Tableau 1.5.

Tableau 1. 5: Récapitulation des logiciels de simulation des SEH

Nature de l'étude					Système hors réseau			Système couplé au réseau		
Logiciel	Econo- mique	Dimens- ionne- ment	Modél- isation et simul- ation	Optimi- sation	PV	Eolien	Bio- diésel	Stockage (Batterie)	PV	Eolien
Homer	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x
RETScreen	x	-	-	-	x	x	x	x	x	x
Hybrid2	x	-	x	\$	x	x	x	x	x	x
iHoga	-	-	x	x	x	-	x	x		-
RAPSIM	x	-	x	\$	x	x	x	x	x	x
SOMES	x	x	x		x	x	x	x		
MESSAGE	x	x	-	x	x	x	x	x	-	-
MatLab	-	x	X	x	x	x	x	x	-	-
LEAP	x	x	x	-	x	x	-	-	-	-
PVSyst	x	x	x	-	x		-	x	x	

**Légende du tableau**

- le logiciel est disponible
- Gratuit           gratuitement
- le logiciel satisfait à ce critère
- En partie        partiellement

Limité	le critère dans ce logiciel est très limité
\$	le statut du logiciel est inconnu par rapport au critère
x	le statut du logiciel satisfait complètement à ce critère
-	absence totale du critère

Les logiciels de dimensionnement et de simulation font de l'optimisation a priori de l'énergie électrique productible sur un site avec différentes approches. Il est important d'évaluer la fiabilité économique de transition vers les sources d'énergies renouvelables. Elle est une métrique qui indique le prix du quota carbone (Prix switch) incitant aux investissements dans les énergies renouvelables développée par '*Climate group*' [23] et d'autres instances [69]. Elle évalue le montant du quota carbone égalisant le coût de production de deux sources différentes d'électricité.

## 1.5. Conclusion

L'accès à l'énergie constitue un élément essentiel dans toute stratégie de développement durable pour des zones rurales et périurbaines. L'utilisation de l'énergies solaire et éolienne est une des solutions anticipatives aux problèmes d'accès à l'électricité des communautés rurales. Le souci de réduire l'effet de l'émission du dioxyde de carbone et encourager l'intégration des énergies renouvelables particulièrement sur un site isolé de communication cellulaire ou avec une hybridation des sources d'énergie suivant la localisation, constituerait en partie à la résolution du problème de développement au Togo où de nombreux sites sont à accès difficile, et dans la sous-région sahélienne puis en général dans le monde.

## **Chapitre 2 : Approches d'optimisation de la consommation énergétique des systèmes de communications**

## 2.1. Introduction

L'approche d'optimisation à priori traduit les méthodes de l'optimisation à la planification et en d'autres termes au dimensionnement. Elle fait recourir aux méthodes d'anticipation afin de résoudre un problème en amont. Cependant, l'optimisation à posteriori embrasse les solutions et techniques de résolution d'un problème en aval. L'optimisation a priori de la consommation énergétique dans les systèmes de télécommunications se fait suivant deux grandes approches de solutions : l'approche matérielle et l'approche logicielle. L'approche de solution matérielle est relative à la première du modèle '*open system for interconnection*' (OSI), alors que l'approche logicielle est relative à la deuxième ou troisième couche. La solution logicielle consiste à une optimisation des algorithmes de routage de la couche réseau (troisième couche) du modèle OSI ; ou encore grâce aux protocoles de coordination du contrôle de l'accès au média (Media Access Control, MAC) de la deuxième couche par l'utilisation des techniques avancées d'accès média. Les solutions matérielles à la couche physique à la réduction de l'énergie s'effectuent par l'utilisation des techniques de codage du canal, des réseaux d'antennes distribuées avec une configuration MIMO, et la typologie physique du réseau à architectures hétérogènes à cellules de taille variable. Selon l'ETSI, la réduction de la consommation de la puissance est nécessaire dans les milieux à faible densité de population comme en milieu rural, alors qu'il faut plutôt d'optimiser le spectre en milieu urbain.

Dans ce chapitre, une architecture hétérogène des cellules sera examinée par la méthode de la programmation linéaire. Le compromis de l'optimisation de l'efficacité énergétique et de l'efficacité spectrale est formulé avec la contrainte de maximisation du débit avec un nombre optimal de femto-cellules. L'intégration des énergies renouvelables est aussi étudiée avec l'optimisation du spectre comme une solution à la réduction de l'émission du gaz à effet de serre (GES). L'optimisation a priori du modèle de propagation est examinée comme une solution à la réduction de la consommation énergétique.

## 2.2. La perte de puissance due aux milieux de propagation

Cette section présente la perte de puissance due aux milieux de propagation et l'optimisation de cette perte par les méthodes mathématiques de régressions avec dans le domaine des télécommunications.

### 2.2.1. Le canal de propagation du signal radioélectrique dans un réseau cellulaire

Le signal émis par une station de base et reçu par un terminal mobile est corrompu par le canal de propagation. Le signal reçu dépend du modèle de propagation utilisé. Le milieu dans lequel la propagation, où la transmission du signal radioélectrique s'effectue est complexe.



a. Schématique

b. Réel

Figure 2. 1: Interface Air de communication

Il comprend beaucoup d'obstacles structurels, en plus le temps. Ce milieu est appelé canal de propagation. La Figure 2.1 illustre un canal de propagation de l'interface air du réseau d'accès cellulaire. Lorsqu'une onde radio rencontre un obstacle, elle subit des pertes. L'énergie peut être absorbée, dispersée, réfléchi.

L'atténuation du signal dépend du type et de la taille de l'obstacle. Par exemple, une forêt est une source d'atténuation considérable pour les systèmes sans fil. Selon



Weissberger, les affaiblissements dus aux arbres d'une forêt, sans feuilles en hiver, et ceux avec des feuilles en été sont respectivement de 3 et de 5 dB [37].

Suivant le canal de propagation, plusieurs copies du signal radioélectrique arrivent à court terme au nœud de réception. Le canal est dit canal de Rice si une copie du signal est prédominante (le canal de Rice) ; il est dit canal de Rayleigh sinon. Si les deux situations sont présentes, le canal est dit canal de Nakagami [37]. La présence de plusieurs copies à court terme introduit une distorsion sur le signal dont le niveau dépend de la longueur d'onde de transmission [19]. Cela s'explique par le fait que l'utilisateur mobile est entouré par plusieurs obstacles en plus de sa taille qui est petite et par conséquent, il reçoit plusieurs signaux relativement de même module. La dispersion et les réflexions induisent des trajets multiples dont les directions et les temps d'arrivées diffèrent. Le délai de Doppler en présence de la mobilité doit aussi être pris en compte. Le codage du canal de propagation à court terme permet d'optimiser les erreurs de transmission. La fluctuation du signal à court terme par rapport à la longueur d'onde est souvent caractérisée par le canal de Rayleigh dans les systèmes de communications mobiles.

### 2.2.2. Le modèle de propagation empirique de l'atténuation du signal

Un modèle de propagation des ondes radioélectriques est une formulation mathématique qui décrit de façon suffisamment précise le canal de transmission ainsi perturbé, afin de prédire la qualité d'une liaison empruntant ce canal.

Dans les systèmes de radiocommunications, plusieurs modèles d'atténuation du signal sont utilisés. Les modèles empiriques des pertes utilisent la distance de séparation entre le terminal mobile ou fixe et l'émetteur la station de base. La formulation empirique de propagation (atténuation du signal), par rapport à la distance et le milieu  $p_l(\vec{m}, \vec{k})$ , est donnée en échelle linéaire par l'Equation (2.1) :

$$p_l(\vec{m}, \vec{k}) = r_k^{-\alpha} \times \chi \quad (2.1)$$

et en décibel (dB) par l'Equation (2.2)

$$P_l(\vec{m}, \vec{k}) = 10 \log_{10} r_k^\alpha + 10 \log_{10} x \quad (2.2)$$

où  $r_k$  est la distance entre le nœud émetteur (récepteur) et la cellule  $k$  (macro, pico, femto);  $x$  est l'atténuation du milieu, avec  $\chi = 10^{x/10}$ , où  $\chi \sim N(0, \sigma^2)$  est l'écart type d'une observation normale, ayant une variance,  $\sigma^2$ , dans la plage de 6-12dB [32] pour la ville de Lomé.  $\alpha$  est l'exposant d'affaiblissement relative au signal sur le trajet. Lorsque  $\alpha > 2$ , le milieu altère fortement le signal, cas typique d'un signal d'utilisateur mobile destiné au nœud émettant. Pour  $\alpha \leq 2$ , la visibilité directe est applicable à la communication entre les nœuds (les antennes relais) d'un réseau hétérogène, le modèle de Friis [37] est utilisé pour l'estimation de l'affaiblissement. Ce modèle ne prend pas en compte les hauteurs des antennes. Il existe plusieurs modèles selon le domaine d'application.

Le modèle de l'union internationale des télécommunications UIT-R370 est beaucoup plus utilisé dans le déploiement et l'optimisation de la télévision terrestre numérique (TNT) [33]. Le modèle d'évaluation de l'affaiblissement du signal le plus employé dans l'optimisation et la planification des réseaux cellulaires est le modèle de Hata-Okumura (HO) [34], [112]. Ce modèle est inclus dans la plupart des environnements de simulation comme Testing Mobile Systems (TEMS), Mentum Planet, Nemo Outdoor, et formule la perte en ligne  $P_l(\vec{m}, \vec{k})$ , par l'Equation (2.3) :

$$P_l(\vec{m}, \vec{k}) = 69.55 + 26.16 * \log(f) - 13.82 * \log(h_{BTS}) \quad (2.3)$$

$$+ (44.9 - 6.55 * \log(h_{BTS})) * \log(d(\vec{m}, \vec{k})) - a(h_{MS}) - X_\sigma$$

où  $a(h_{MS})$  est un facteur correctif relatif à la hauteur du mobile MS,  $h_{MS}$ .  $X_\sigma$  est un facteur dépendant de l'environnement et de la fréquence  $f$  qui varie de 150 MHz- et 1500 MHz.

Le modèle de COST231 est une amélioration du modèle de Hata devant être utilisé dans les villes européennes, exprimé par l'Equation (2.4) :

$$P_l(\vec{m}, \vec{k}) = 46,3 + 33,9 * \log(f) - 13,82 * \log(h_{BTS}) \quad (2.4)$$

$$+ (44,9 - 6,55 * \log(h_{BTS})) * \log(d(\vec{m}, \vec{k})) - a(h_{MS})$$

$$- X_\sigma$$

où,  $f$  est la fréquence, en MHz ;  $d$  est la distance entre le mobile et la station de base, en km ;  $h_{BTS}$  est la hauteur de la station de base par rapport au sol, en m ;  $X_\sigma$  est un facteur de correction. Il est de 0 dB pour les zones semi-urbaines et rurales, et de 3 dB pour les environnements urbains ;  $a$  est un facteur de correction de l'antenne du mobile.

Tous ces modèles empiriques peuvent être écrits par un modèle de régression par rapport à la distance de séparation entre l'antenne émettrice et l'autre réceptrice par l'Equation (2.5) :

$$y = \beta_0 + \beta_1 \cdot \log(d) + X_\sigma \quad (2.5)$$

où  $\beta_0$  est un intercepte de la droite de régression (ordonnée à l'origine),  $\beta_1$  le coefficient directeur de la droite exprimant l'atténuation par rapport à la longueur d'onde en court-terme et  $X_\sigma$  l'effet de l'environnement.

L'effet de l'atténuation du milieu est inter-dépendent de la fréquence de la porteuse (ou de transmission). Une fréquence élevée subit un affaiblissement plus important qu'une fréquence basse. Les résultats reportés sur l'étude de la ville de Lomé, à la référence [32], indiquent que l'atténuation relative à la fréquence de transmission est de 9,5 dB à 450 MHz, et de 11,3 dB à 850 MHz. Il faut aussi souligner que l'environnement et la fréquence de transmission sont des paramètres pertinents dans le contrôle de la puissance. Cela explique la nécessité du calibrage des modèles de prédiction sur la propagation des ondes radios à l'aide des algorithmes mathématiques dans les réseaux de communication sans fil, notamment le cas des systèmes cellulaires [34], [33], [112]. Les réseaux de neurone artificiels (RNA) sont également utilisés pour la prédiction adéquate du signal reçu dans les réseaux mobiles cellulaires terrestres [38] et [68].

### 2.2.3. Utilisation de la méthode de régression des moindres carrés

La méthode de régression des moindres carrés est intensément utilisée dans l'ingénierie de la planification de la couverture, et dans la télé trafic [34], [37]. Elle

permet de trouver la pente d'accroissement par une méthode de régression linéaire à une variable. Pour une variable  $x_1$ , elle s'écrit par l'Equation (2.6)

$$y = \beta_1 + \beta_2 x_1 + \varepsilon \quad (2.6)$$

où  $y$  représente la réponse ;  $\beta_1$  et  $\beta_2$ , sont des coefficients de régression, et  $\varepsilon$  est l'erreur obtenue. La moyenne de l'erreur quadratique  $\varepsilon$  est exprimée par l'Equation (2.7)

$$\varepsilon(\beta_1, \beta_2, x_1) = \sqrt{\left(\frac{1}{L}\right) \sum_{l=1}^L [y_l - P_{T_o \rightarrow l}]^2} \quad (2.7)$$

où  $P_{T_o \rightarrow l}$  la valeur théorique obtenue à partir d'un modèle empirique et  $y_l$  est la valeur dynamique observée (mesurée),  $L$  est la taille de l'échantillon des données observées. La minimisation de l'erreur implique que toutes les dérivées partielles de la fonction d'erreur quadratique soient égales à zéro exprimée par l'Equation (2.8) :

$$\Rightarrow \begin{cases} \frac{\partial \varepsilon}{\partial \beta_1} = 0 \\ \frac{\partial \varepsilon}{\partial \beta_2} = 0 \\ \frac{\partial \varepsilon}{\partial x_1} = 0 \end{cases} \quad (2.8)$$

écrit sous la forme matricielle donné par l'Equation (2.9) :

$$W \times \bar{y} := \begin{bmatrix} 1 & C_1 \\ 1 & C_2 \\ \vdots & \vdots \\ 1 & C_L \end{bmatrix} \times \begin{bmatrix} \beta_1 \\ \beta_2 \end{bmatrix} \quad (2.9)$$

les coefficients optimaux  $C$ ,  $\beta_1$  et  $\beta_2$  définissant les conditions quadratiques sont obtenus des solutions au sens stricte des moindres carrés par l'Equation (2.10)

$$\bar{C}_{LS} = [W^T W]^{-1} W^T Y. \quad (2.10)$$

La méthode de régression multiple à plusieurs variables produit plusieurs pentes. La méthode de régression linéaire multiple à deux variables  $x_1$  et  $x_2$  est définie par l'Equation (2.11) :

$$y = \beta_0 + \beta_1 x_1 + \beta_2 x_2 + \varepsilon \quad (2.11)$$

où  $y$  représente la réponse,  $\beta_0, \beta_1, \beta_2$ , sont des coefficients de régression, et  $\varepsilon$  est l'erreur induite. La minimisation de l'erreur  $\varepsilon$ , peut être formulée par l'Equation (2.12) :

$$\min y(x_1, x_2) \quad (2.12)$$

sous contrainte de :

$$x_1 \in X_1$$

$$x_2 \in \arg \min g(x_1, x_2) ; \text{ et } x_2 \in X_2$$

A partir des mesures obtenues l'on peut calibrer le modèle de prédiction de l'affaiblissement du signal. Par exemple, si l'on considère les modèles empiriques de Friis et Hata Okumura (HO), on pourra utiliser la méthode de régression appliquée aux deux régions de rayonnement d'une antenne-relai, telles qu'une région proche et l'autre éloignée pour trouver les coefficients de régression à partir des mesures obtenues dans l'environnement lors d'une optimisation a priori.

La procédure consistera à définir une pente lorsque le modèle de propagation dans le vide ne peut plus s'appliquer, et de plus le modèle de Hata-Okumura (H.O) n'est pas valide pour des distances inférieures à 1 km. Alors, on peut écrire la pente,  $DecPL$  dans le rayonnement proche par l'Equation (2.13) :

$$DecPL = \frac{PL_{al}^{Hata} * (\log d_{BP}) - PL_{al}^{FSL} * (\log d_0)}{(\log d_{BP}) - (\log d_0)} \quad (2.13)$$

avec  $PL_{al}^{FSL}$  et  $PL_{al}^{Hata}$  les pertes de puissances calculées à partir des modèles de Friis et de Hata [37].

On calcule la perte en ligne obtenue à partir du modèle de Friis qui stipule que le signal décroît avec la distance au 20 dB/décade. L'affaiblissement est de 20 décade à une distance de référence  $d_0$  où l'on suppose qu'il y a une visibilité directe entre

le mobile et l'antenne, sinon on choisit une distance de coupure  $d_{BP} = 1km$ , la distance à partir de laquelle le modèle de Hata est vérifié. Pour  $d_0 \leq d \leq d_{BP}$  la perte  $PL_{al}^N(d)$  en zone de rayonnement proche de l'antenne est donnée par l'Equation (2.14) :

$$PL_{al}^N(d) = PL_{al}^{Hata}(d_{BP}) + DecPL * [(\log d) - (\log d_{BP})] \quad (2.14)$$

où  $d$  est la distance de séparation entre deux nœuds distincts.

Dans la zone de rayonnement éloignée de l'antenne  $PL_{al}^F(d)$ , l'atténuation due au milieu  $X_\sigma$ , doit être incorporée, il est exprimée par l'Equation (2.15) :

$$PL_{al}^F(d) = PL_{al}^{Hata}(d_{BP}) + DecPL * [(\log d) - (\log d_{BP})] + X_\sigma \quad (2.15)$$

où  $d_{BP} \leq d \leq +inf$ .

Dans cette thèse, pour évaluer l'atténuation due au milieu (shadowing)  $X_\sigma$ , un filtre prédicteur à coefficient linéaire (LPC) est utilisée.

Un filtre prédicteur à coefficient linéaire (Linear predictive coefficient, LPC) détermine les coefficients en minimisant l'erreur de prédiction au sens des moindres carrés. Il est utilisé dans des applications de conception du codage de la parole et d'identification des systèmes [72]. Dans les systèmes d'analyse, le codage prédictif linéaire est connu sous le nom de processus d'optimisation mathématique. Dans le logiciel Matrix Laboratory Matlab [89], la fonction `lpc(x, p)` recherche les coefficients d'un prédicteur linéaire d'ordre  $p$ -ième qui prédit la valeur actuelle de la série temporelle à des valeurs réelles  $x$  à partir d'échantillons passés. Cette méthode s'inscrit dans les méthodes régressives. L'erreur estimée du filtre  $e(n)$  est donnée par l'Equation (2.16) :

$$e(n) = x(n) - \hat{x}(n) \Rightarrow \begin{cases} \hat{x}(n) = \sum_{i=1}^p a_i x(n-i) \\ a_i = [1, a(2) \dots a(p+1)] \end{cases} \quad (2.16)$$

où  $\hat{x}(n)$  est le signal prédit,  $p$  est le degré du polynôme, et  $a_i$  est le coefficient du prédicteur qui est le critère de l'autocorrélation de la série. Lorsque la valeur  $a_i = 1$ , le filtre est linéaire.

## 2.3. Optimisation énergétique par intégration des énergies renouvelables

Cette section présente la formulation du problème de maximisation du débit dans un milieu à forte densité de population avec la réduction de la consommation énergétique du système par un déploiement des cellules de taille petite. La topologie architecturale du réseau est supposée hétérogène lorsque le système comprend au moins une combinaison de macro-cellule et des pico-cellules, ou des femto-cellules.

### 2.3.1. Description du système d'étude

La Figure 2.2 illustre un réseau hétérogène avec alimentation à sources d'énergie hybride.

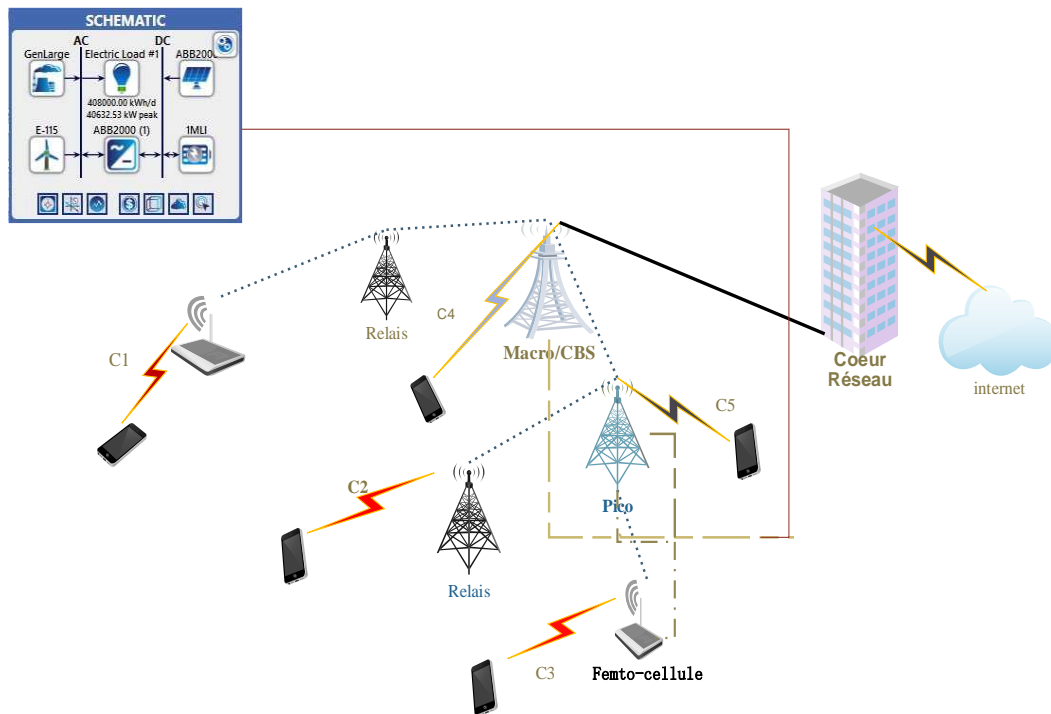


Figure 2. 2: Schématique du réseau hétérogène avec micro-réseau électrique

Une architecture hétérogène est considérée, et est constitué d'un ensemble de nœuds à types macro cellules interconnectées entre elles par l'intermédiaire des interfaces logiques. En raison de la qualité de service (QOS) et la maximisation de la capacité, ces nœuds sont supportés par d'autres types de cellules de petite taille à faible puissance afin de servir tous les utilisateurs qui sont, en particulier,

géographiquement situés dans des endroits caractérisés par un signal faible. Ces cellules de taille petite sont des picocellules, des femtocellules, et des relais.

Les picocellules : sont déployés par l'opérateur dans des zones non couvertes ou dans les zones où l'utilisation des téléphones est très dense pour ajouter de la capacité. Ils sont connectés aux macrocellules par des liaisons filaires.

Les femtocellules : sont généralement utilisés pour étendre la couverture aux zones intérieures (maison, petite entreprise, station de train, etc.) non accessibles par la station macro. Leur particularité par rapport aux autres stations est qu'ils sont déployés par les clients mais aux aussi peuvent être déployées par l'opérateur. Ils sont connectés directement au cœur du réseau via une liaison filaire (ADSL, fibre optique).

Les relais : sont déployés principalement pour étendre la couverture de la macrocellule ou bien pour améliorer le débit dans des zones très denses dans lesquelles la macrocellule toute seule est incapable de servir tous les utilisateurs.

Le tier système multi-émetteurs de la Figure 2.3 est constitué d'un nombre  $I$  d'utilisateurs (MS) et  $K$  émetteurs tels que les  $R$  relais d'extension,  $P$  pico  $F$  femto, et  $M$  macro-cellules sont des émetteurs indépendants ( $R+F+P+M= K$ , la somme totale des émetteurs est égale  $K$ ). Les femto-cellules, pico-cellules, les relais d'extension et la station de base centrale (la macro-cellule, dit CBS, eNodeB) sont connectés au cœur réseau par un support en fibre optique. Les relais non-transparents sont considérés car ils peuvent être utilisés comme des cellule. Dans un réseau hétérogène, les usagers mobiles ne sont pas supposés être servis par le plus proche émetteur. L'état des canaux est parfaitement connu par les cellules, et les mobiles peuvent ajuster leur puissance de transmission.

Les émetteurs peuvent être considérés comme des unités d'antennes distantes. La topologie est supposée hétérogène. Les relais d'extension sont déployées à 70% du rayon de la macrocellule [55] pour une transmission optimale du terminal mobile.

Les pico-cellules, femto-cellules et les relais sont interchangeableables. La femto-cellule et le relai d'extension ne peuvent pas être utilisés simultanément compte tenu des coûts d'exploitation et opérationnel.



### 2.3.2. Evaluation de la puissance totale du système

Dans cette section la puissance totale de consommation du système est différenciée de la puissance de transmission en plus la modélisation du signal sur bruit et interférence.

#### 2.3.2.1. Modélisation de la puissance du système

Le modèle de EARTH de la puissance consommée  $P_{i,k}$  d'un nœud  $k$  identifie deux modes de fonctionnement en transmission ou en veille donné par l'Equation (2.17)

$$P_{i,k} \begin{cases} = (P_0 + \Delta p \cdot P_{out}) \times N_{Tx} \\ = P_s \times N_{Tx} \end{cases} \quad (2.17)$$

avec  $P_0$  la puissance statique (comprenant le refroidissement et les autres),  $\Delta p$  le coefficient en fonction du trafic,  $P_{out}$  la puissance à la sortie de chaque transceiver,  $P_s$  puissance consommée en mode veilleuse,  $N_{Tx}$  nombre de transceivers.

La puissance totale dissipée  $P_{To}$  du système est donnée par l'Equation (2.18) :

$$P_{To} = \sum_{k=1}^K a_k \cdot n_k \cdot P_k \cdot f_k \quad (2.18)$$

où  $K$  est le nombre de types de stations de base utilisés dans le réseau,  $n_k$  est le nombre total de stations de base d'un type spécifique ( $R+F+P+M=K$ ) par exemple pour le nombre de femto-cellule  $n_k = F$ . Le paramètre  $P_k$  est la consommation d'énergie d'une station de base de type  $k$ , et  $f_k$  le facteur d'utilisation ; avec  $a_k \in \{0,1\}$  une variable binaire qui prend la valeur 1 si un nœud  $k$ , est allumé (en activité de service) et 0 (si elle est en veille).

En considérant la consommation de puissance du support réseau  $P_{Backh}$ , la consommation de puissance totale  $P_{To}$  du système s'écrit par l'Equation (2.19) :

$$P_{To} = \sum_{k=1}^K a_{i,k} \cdot n_k \cdot P_k \cdot f_k + P_{Backh} \quad (2.19)$$

$P_{Backh}$  peut être estimée suivant la technologie et le type de réseau [125].

Pour un service dans le lien descendant à un terminal mobile  $MS_{i,k}$ , dans une cellule active  $k$ , la puissance de consommation  $P_{i,k}$ , [42] est liée à la puissance de la liaison descendante  $P_{T_{i,k}}$ , à la puissance de transmission de la liaison ascendante  $P_o$ , à la puissance électrique verte  $P_{gr}$ , introduite dans le système pour la réduction du taux du dioxyde de carbone peut-être formulée par l'Equation (2.20):

$$P_{i,k} = P_{T_{i,k}} + P_o - P_{gr} \quad (2.20)$$

avec la puissance de la liaison descendante  $P_{T_{i,k}}$ , comme suit l'Equation (2.21):

$$P_{T_{i,k}} = P_{i,k} - P_o - P_{gr} \quad (2.21)$$

Si un facteur de proportionnalité  $k_0$  est introduit la puissance électrique verte injectée  $P_{gr}$ , dans le système par rapport à la puissance totale dissipée (dépensée)  $P_{T_o}$ , dans le système est exprimée par l'Equation (2.22)

$$P_{gr} = k_0 * P_{T_o} \quad (2.22)$$

On peut écrire, pour un système multi-émetteurs, la puissance totale de transmission de la liaison descendante par l'Equation (2.23) :

$$C_p = p_{dl} \sum_{k=1}^K \sum_{i=1}^I p_{dl} \cdot P_{T_{i,k}} = p_{dl} \cdot (P_{T_o} - P_{gr} - \sum_1^K P_{o,k}) \quad (2.23)$$

avec  $p_{dl}$  la probabilité de la liaison descendante,  $P_{o,k}$  est la consommation des petites cellules et des autres cellules macrocellules à statut non-actif. Le taux du dioxyde de carbone associé à différentes sources de production électrique [43] est donné par l'Equation (2.24) :

$$T_{GES} = \sum_k^K F_k P_k \quad (2.24)$$

$F_{i,k}$  est le facteur d'émission de la source d'alimentation appliquée à cette cellule,  $P_{i,k}$ , est la consommation de puissance due à cette cellule. Il faut noter qu'en pratique chaque nœud macrocellule est alimenté soit par un groupe électrogène ou une source d'énergie thermique.

En supposant un commutateur inverseur  $s_0$  comme dans le cas pratique sur les sites, la puissance totale disponible  $P_{Ro,k}$  sur le bus est définie par l'Equation (2.25) :

$$P_{Ro,k} = k_o \cdot s_0 \cdot C_{Cst} + (1 - s_0)(1 - k_0)P_{gr} \quad (2.25)$$

$k_0$  est une constante de proportionnalité de l'énergie verte  $P_{gr}$ ,  $s_0$  est une valeur binaire qui prend la valeur 1 si la source principale est mise en marche  $C_{Cst}$  et la valeur 0 si la source est éteinte. Le facteur  $(1 - s_0)$ , implique que les générateurs renouvelables ne peuvent pas être mis en marche lorsque la source principale est allumée. la puissance totale disponible  $P_{Ro,k}$  s'écrit encore par l'Equation (2.26)

$$P_{Ro,k} = P_{To} + \delta P \quad (2.26)$$

où  $\delta P$  la consommation due aux pertes électriques de transport. Cette perte peut être optimisée au dimensionnement ou quantifiée à partir de la collecte des données par rapport à la longueur qui sépare la charge et la source sur le bus de distribution.

Suivant la loi de la conservation d'énergie on a l'Equation (2.27) :

$$s_0 k_o \cdot C_{Cst} + (1 - s_0)(1 - k_0)P_{gr} - (P_{To} + \delta P - s_{bb} * \frac{E_{bb}}{T}) = 0 \quad (2.27)$$

avec le temps d'observation  $T$ , l'énergie stockée  $E_{bb}$  par les batteries, si le commutateur de la batterie  $s_{bb}$  est basculé sur 1, est donnée par l'Equation (2.28)

$$E_{bb} = \int (s_0 k_o \cdot C_{Cst} + (1 - s_0)(1 - k_0)P_{gr}) \cdot dt \quad (2.28)$$

La puissance des énergies renouvelables  $P_{gr}$ , est exprimée par l'Equation (2.29)

$$P_{gr} = \frac{T \cdot (P_{To}) - E_{bb} - T * [s_0 k_o \cdot C_{Cst}]}{T \cdot (1 - s_0)(1 - k_0)} \quad (2.29)$$

### 2.3.2.2. Le signal sur bruit et la capacité de la cellule

Pour modéliser le signal sur bruit et interférence et la capacité de la cellule, une reformulation de la puissance de transmission (de la liaison descendante) est considérée.

La probabilité pour une cellule active  $f_{ac,i,k}$  [84] lorsqu'un utilisateur  $MS_{i,k}$  est connecté à cette cellule active  $k$  est donnée par l'Equation (2.30a) :

$$f_{ac,i,k} = 1 - (1 + 1/(\mu_k \cdot \rho_k))^{-\mu} \quad (2.30a)$$

Avec  $\rho_k = \frac{\lambda_{bk}}{\lambda_l}$  est le rapport de densité BS-utilisateurs où  $\lambda_{bk}$  est la densité des nœuds ( $\lambda_{bk} = \prod_{k=1}^K \lambda_k$ , le produit de la densité des nœuds de type  $k$ ),  $\lambda_l$  la densité d'utilisateurs, et  $\mu_k$  une constante liée à la distribution de la taille des cellules. Dans une architecture homogène de type macrocellule, la distribution est décrite par une distribution de Poisson point à point (PPP) avec  $\mu = 3,55$ . La probabilité pour une cellule non-active est exprimée par l'Equation (2.30b)

$$f_{id} = \left(1 + \frac{1}{\mu \cdot \rho}\right)^{-\mu} \quad (2.30b)$$

en utilisant la formule de Bayes [92], la probabilité conditionnelle de commutation d'une cellule  $f_{tr}$  se relate par l'Equation (2.31) :

$$f_{tr} = \frac{P(f_a | f_{id}) \cdot P(f_a)}{P(f_a | f_{id}) \cdot P(f_{id}) + P(f_{id} | f_a^c) \cdot P(f_{id}^c)} \quad (2.31)$$

et l'expression de la puissance de la liaison descendante  $P_{T_{i,k}}$  est définie comme étant liée à la puissance émise  $P_{out}$  à la fraction d'utilisation  $f_{ac}$ , au rendement de l'amplificateur  $\eta$  au nombre de transceivers  $N_{Tx}$  au nombre d'antennes  $\lambda_k$  et au trafic  $\Delta P$  qui est donnée par l'Equation (2.32) :

$$P_{T_{i,k}} = \lambda_k \cdot f_{ac,k} \cdot \Delta P \cdot \frac{P_{out}}{\eta} \times N_{Tx} \quad (2.32)$$

Lorsqu'un canal Gaussien est supposé, le rapport signal sur bruit  $\gamma_{i,k,DL}$ , à un  $MS_i$  dans une cellule  $k$ , est écrite à la référence [135] par l'Equation (2.33a) :

$$\gamma_{i,k,DL} = \frac{p_{T_{i,k}} \cdot |h_{i,k}|^2}{\sigma_z^2} \quad (2.33a)$$

avec  $p_{T_{i,k}}$  la puissance émise par la cellule  $k$  sur le mobile  $MS_{i,k}$ , et  $h_{i,k}$ , l'atténuation du milieu subie, et  $\sigma_z^2$  est la variance du bruit blanc additif Gaussien.

La puissance optimale de transmission  $p_{T,i,k}^*$  de chaque cellule k est exprimée par l'Equation (2.33b)

$$p_{T,i,k} = \left( \frac{1}{\max |h_i(i,k)|^2} - \frac{\sigma^2}{\lambda_{i,k}} \right)^+ \quad \forall i, k \quad (2.33b)$$

avec  $\lambda_{i,k}$  sont les multiplicateurs de Lagrange.

Pour un canal de Rayleigh, le rapport signal sur bruit et interférence  $\text{SINR}_i$ ,  $\gamma_{i,k_{DL}}$ , à un  $MS_{i,k}$  situé dans une cellule k (dans la liaison descendante) est calculée par l'Equation (2.34a) :

$$\gamma_{i,k_{DL}} = \frac{p_{t,k} p_{L,i,k}^{-1}}{n_0 + I_{m,i,k}} \quad (2.34a)$$

avec

$$I_{m,i,k} = \sum_{j \neq i}^N i_0 + \sum_{j \neq k}^N \sum_{Lp} \sum_{j \neq i} p_{T,j,k} + n_0 \quad (2.34b)$$

où  $p_{T,j,k} = g_{j,k} * \chi * r^{-\alpha}$ ,  $i_0 = g_{i,k} * p_{L,i,k}^{-1}$

et  $p_{T,k}$  est la densité spectrale de puissance de transmission du nœud ou de la cellule, k ;  $p_{T,j,k}$  est la densité spectrale de puissance de transmission des nœuds interférents,  $n_0$  est la densité spectrale de puissance du bruit blanc additive gaussien,  $I_m$  est l'interférence due aux accès multiples venant des autres utilisateurs et les cellules de faible puissance sur le terminal,  $i$  dénoté  $MS_{i,k}$ .  $I_m$  est exprimé pour un réseau hétérogène, comprenant une macrocellule, picocellule et femtocellule [4]. Le gain de l'antenne émettrice de la cellule  $g_{i,k}$ , et des nœuds interférents dans le voisinage  $g_{j,k}$  et  $p_{L,i,k}^{-1}$  est la perte de puissance due au canal de transmission entre l'émetteur et le terminal mobile,  $Lp$  est le nombre de type de cellules à puissance faible.

Si une communication coopérative entre les nœuds K est supposée pour supporter le terminal, alors le rapport signal sur bruit et interférence (SINR)  $\gamma_{i,k_{DL}}$  est exprimé par l'Equation (2.34c) :

$$\gamma_{i,k_{DL}} = \frac{\sum_{k=1}^K p_{t,k} p_{L,i,k}^{-1}}{n_0 + I_{m,i,k}} \quad (2.34c)$$

### 2.3.3. La capacité et l'efficacité énergétique du système

La capacité du système est liée à l'efficacité spectrale de la cellule et par conséquent de chaque utilisateur. Pour une région délimitée, la capacité d'une cellule est fonction du nombre d'antennes émettrices.

Dans cette section la capacité et l'efficacité énergétique du système sont formulées.

#### 2.3.3.1. Le débit de transmission et la capacité de transport

La capacité de transport  $C_T$  se base sur la notion bit-mètre, qui signifie qu'un bit est transporté sur une distance d'un mètre vers sa destination. Lorsqu'un nœud  $k_1$  peut transmettre vers le nœud  $k_2$  avec un débit  $\lambda_{12}$  en bits par seconde et que la distance entre  $k_1$  et  $k_2$  est égale à  $d_{12}$  en mètre. La capacité de transport  $C_T$  exprimée en bit-mètre par seconde est en fait la capacité de débit multipliée par la distance entre la source et la destination [6] par l'Equation (2.35)

$$C_T(k_1, k_2) = \lambda_{12} * d_{12}. \quad (2.35)$$

Le débit de transmission  $\eta_{SE}(i, k)$  de Shannon [18] de chaque utilisateur  $MS_{i,k}$ , servi par la cellule  $k$ , est donnée par l'Equation (2.36)

$$\eta_{SE}(i, k) = N_B \cdot B \cdot \log_2(1 + \gamma_{i,kDl}) \quad (2.36)$$

avec  $B$  la bande passante de chaque bloc de ressource et  $N_B$  le nombre de bloc de ressources qui sont alloués à l'utilisateur  $MS_{i,k}$ .

Lorsqu'une modulation cohérente d'amplitude de deux porteuses en quadrature (M-QAM), est considérée pour atteindre le taux de transfert à la limite de Shannon avec un taux d'erreur  $\beta$  lié à la technique de pré-codage du canal, l'efficacité spectrale  $\eta_{SE}(i, k)$ , de chaque utilisateur  $MS_{i,k}$  est exprimée par l'Equation (2.37):

$$\eta_{SE}(i, k) = N_B \cdot B \cdot \log_2(1 + \beta \cdot \gamma_i \cdot p_{t,k}) \quad (2.37)$$

où  $p_{t,i,k}$ , est la puissance de transmission du nœud  $k$  vers le  $MS_{i,k}$ . Ce canal est très limité, et non convenable en modélisation pratique d'un système à cellules

hétérogènes. Mais pour les études théoriques, cela permet d'obtenir des résultats plus rapidement.

Dans la théorie de l'information, la capacité de Shannon allouée à l'utilisateur  $MS_{i,k}$  est le nombre total  $C$  des sous canaux (des blocs de ressources radio,  $r_i$ ) donnée par l'Equation (2.38)

$$\eta_{SE}(i, k) = \sum_c^C r_i^c. \quad (2.38)$$

Par exemple dans le LTE, les sous canaux sont appelés des blocs de ressources. Un bloc de ressource est la plus petite entité que l'on peut ordonnancer dans le domaine de la fréquence partagée. Cela signifie qu'un terminal mobile peut recevoir ou transmettre, dans un bloc de ressource ou dans plusieurs blocs. La taille d'un bloc de ressource est la somme de 12 sous-canaux (sous-porteuses) ayant un espacement de 15 kHz (de largeur 180 kHz) dans toute la bande allouée  $B$ . Suivant une allocation équitable des blocs de ressources  $RB_{i,c} = \frac{N_B}{I}$ , entre le nombre d'utilisateurs  $I$ , on a  $N_B = \sum_c^C RB_{i,c}$ .

Pour une bande de 20 MHz, il y a 100 blocs de ressources qui peuvent transporter les trafics des utilisateurs. Cela implique qu'un nœud E-nodeB pour la LTE peut supporter 100 utilisateurs différents à chaque intervalle de 1ms.

La maximisation du débit du système par rapport au nombre de ressources disponibles sur tous les liens des nœuds est exprimée par l'Equation (2.39)

$$\max \eta_A = \max_{x_{i,k}, p_{tM,k}} B * \sum_{c=1}^C \sum_{k=1}^K \sum_{i=1}^I RB_{i,c} \cdot x_{i,k} \quad (2.39)$$

sous contrainte de  $p_{tM,k} \in [0, P_{T_{ik}}^{max}]$

$$\sum_{i=1}^I p_{tM,k} \leq P_{T_{ik}}^{max}$$

$$\sum_{k=1}^K \sum_{i=1}^I x_{i,k} \leq 1$$

En réalité pour atteindre la capacité limite de Shannon, quelques paramètres de la technologie du LTE sont considérés tels que  $\beta_{sys}$  l'efficacité de l'utilisation de la

bande allouée de la technologie,  $N_B$  le nombre de bloc ressource, et  $\gamma_{sys}$  l'habilité à la rejection au bruit. On peut écrire le débit acquis  $\eta_{SE}(i, k)$  pour chaque utilisateur par l'Equation (2.40) :

$$\eta_{SE}(i, k) = \beta_{sys} \cdot N_B \cdot B \cdot \log_2 \left( 1 + \frac{\gamma_{i,k,DL}}{\gamma_{sys}} \right) \quad (2.40)$$

où le facteur  $\gamma_{sys}$  prend une valeur de 1,6 à 2 dB.

Le débit total  $\eta_{A_k}$  de la cellule k étant limité, cela peut être écrit par l'Equation (2.41) :

$$\eta_{A_k} = \sum_i^I a_{i,k} \cdot x_{i,k} \cdot \eta_{SE_k}(i, k) \leq T_{0_k} \quad (2.41)$$

$x_{i,k}$  est un paramètre binaire, il est égal à 1 pour un utilisateur connecté, et 0 sinon, et  $a_{i,k} \in \{0, 1\}$  étant des variables binaires qui prennent la valeur 1, si la BS, k est activé.  $T_{0_k}$  est le débit maximal que peut atteindre la cellule de type k .

Le débit total du système  $\eta_A$  est la somme totale du débit des différentes utilisateurs du système est obtenu par l'Equation (2.42) :

$$\eta_A = \sum_k^K \eta_{A_{i,k}} \quad (2.42)$$

avec  $\eta_{A_{i,k}}$  est le taux de transfert individuel acquis par chaque type de cellule k.

Pour un système spécifique constitué de R relais d'extension, P pico, F femto, et M macro-cellules tel que  $R+F+P+M= K$ , la somme totale des émetteurs est égale K auquel est associé  $\eta_{A_{i,m}}$  le débit maximal de la macrocellule,  $\eta_{A_{i,p}}$  le débit maximal des picocellules,  $\eta_{A_{i,f}}$  le débit maximal des femtocellules,  $\eta_{A_{i,ra}}$  le débit maximal des relais.

Le débit du système est donné par l'Equation (2.43):

$$\eta_A = \sum_m^M \eta_{A_{i,m}} + \sum_p^P \eta_{A_{i,p}} + \sum_f^F \eta_{A_{i,f}} + \sum_{ra}^R \eta_{A_{i,ra}} \quad (2.43)$$



pour un système hétérogène à macro-cellules et de petites cellules de type femtocellules, l'efficacité spectrale  $\eta_A$  s'écrit par l'Equation (2.44) :

$$\eta_A = \sum_m^M \eta_{A_{i,m}} + \sum_f^F \eta_{A_{i,f}} \quad (2.44)$$

en introduisant la densité des nœuds [90], [107], l'efficacité spectrale du système  $\eta_A$  constitué de la macrocellule et des petites cellules devient comme exprimée dans l'Equation (2.45)

$$\eta_A = \lambda_m \cdot \eta_{A_{km}} \cdot \exp(-\Omega_m) + \lambda_f \cdot \eta_{A_{kf}} \cdot \exp(-\Omega_f) \quad (2.45)$$

avec  $\Omega_m = A_{k_m} (\lambda_m + \lambda_f \cdot \zeta)$ ,  $\Omega_f = A_{k_f} (\lambda_f + \lambda_m \cdot \zeta^{-1})$  où  $\zeta = \left(\frac{P_f}{P_M}\right)^{2/\alpha}$  représente le ratio de la puissance de transmission de la petite cellule  $P_f$ , sur celle de la macro-cellule  $P_M$ . Les paramètres  $A_{k_m}$  et  $A_{k_f}$  sont liés à l'aire de couverture de service des macrocellules et des petites cellules.  $\lambda_m$  et  $\lambda_f$  sont la densité des macrocellules et des femtocellules respectivement ; l'efficacité spectrale des cellules macro  $\eta_{A_{km}}$  et celle des petites cellules  $\eta_{A_{kf}}$ .

Dans une communication coopérative, la capacité de lien est exprimée par l'Equation (2.46)

$$\eta_A = t_1 \cdot \lambda_m \cdot \eta_{A_{km}} \cdot \exp(-\Omega_m) + t_2 \cdot \lambda_f \cdot \eta_{A_{kf}} \cdot \exp(-\Omega_f) \quad (2.46)$$

où  $t_1 + t_2 = t_i$  avec  $t_i$  le temps alloué à l'utilisateur pour transmettre.  $t_1$  est le temps passé sur le nœud de type 1 et  $t_2$  pour le nœud de type 2.

### 2.3.3.2. L'efficacité énergétique par rapport à la puissance de transmission

L'efficacité énergétique EE,  $\gamma_{EE}(A)$  est le ratio de l'efficacité spectrale totale SE,  $\eta_A$  sur la puissance de transmission disponible  $P_t(A)$  ou sur la consommation totale du système. L'efficacité énergétique EE,  $\gamma_{EE}(A)$  en bit/s/W (ou bit/s/joule) est le ratio de SE,  $\eta_A$  en bit/s/Hz sur la puissance de transmission ou de consommation totale du système en W.

Alors, l'efficacité énergétique  $\gamma_{EE}(A)$  se détermine par l'Equation (2.47) :

$$\gamma_{EE_k}(A) = p_{dl} * \frac{\eta_{A_k}}{P_t(A_k) + p_c(A_k)} \quad (2.47)$$

où  $p_{dl}$  est la probabilité de la communication de la liaison descendante avec,  $P_t(A_k) = P_{T_{i_k}}$  la puissance de transmission et  $p_c(A_k) = \lambda_b(P_0 + f_{id} \cdot P_c)$  représente la puissance des circuits de traitement et des composants de la non-transmission.

En substituant (2.44) et (2.23) dans (2.45), l'efficacité énergétique du système EE  $\gamma_{EE_{Dl}}(A)$ , s'écrit par l'Equation (2.48):

$$\gamma_{EE_{Dl}}(A) = p_{dl} * \frac{\eta_A}{(1 - k_0) \cdot P_{T_0} - \lambda_k \sum_1^K P_{o,k}} \quad (2.48)$$

l'efficacité énergétique EE sur la liaison descendante  $\gamma_{EE_{Dl}}(A)$  est calculée par :

$$\begin{aligned} \gamma_{EE_{Dl}}(A) = p_{dl} * \frac{\eta_{A_{active}}}{(1 - k_0) \cdot P_{T_0} - \lambda_k \sum_1^K P_{o,k}} + (1 - p_{dl}) \\ * \frac{\eta_{A_{idle}}}{(1 - k_0) \cdot P_{T_0} - \lambda_k \sum_1^K P_{o,k}} \end{aligned} \quad (2.49a)$$

pour les mobiles actifs  $A_I$ , elle est donnée par l'Equation (2.49b)

$$\gamma_{EE_{Dl}}(A) = p_{dl} * \frac{\sum_{k=1}^K \sum_{i=1}^{A_I} x_{i,k} \cdot \eta_{SE_{i,k}}(i)}{(1 - k_0) \cdot P_{T_0} - \lambda_k \sum_1^K P_{o,k}} \quad (2.49b)$$

pour les mobiles non actifs  $B_I$ , elle s'écrit par l'Equation (2.49c) :

$$\gamma_{EE_{Dl}}(A) = (1 - p_{dl}) * \frac{\sum_{k=1}^K \sum_{j=1}^{B_I} (1 - x_{j,k}) \cdot \eta_{SE_{j,k}}(j)}{(1 - k_0) \cdot P_{T_0} - \lambda_k \sum_1^K P_{o,k}} \quad (2.49c)$$

### 2.3.3.3. L'efficacité énergétique par rapport à la puissance de consommation

Pour un système constitué de R relais d'extension, P pico, F femto, et M macro-cellules lequel est associée la consommation totale du nœud de type k  $P_{i,k}$ . On a respectivement  $P_{i,m}$  la consommation d'une macrocellule,  $P_{pl}$  la consommation

d'une picocellule,  $P_{fe}$  la consommation d'une femtocellule, et  $P_{ra}$  la consommation d'un relais, et  $\eta_{A_{i,m}}$  le débit maximal de la macrocellule,  $\eta_{A_{i,p}}$  le débit maximal des picocellules,  $\eta_{A_{i,f}}$  le débit maximal des femtocellules,  $\eta_{A_{i,ra}}$  le débit maximal des relais.

L'efficacité énergétique  $\gamma_{EE}(A)$  se formule par l'Equation (2.50) :

$$\gamma_{EE}(A) = p_{dl} * \frac{\sum_m^M \eta_{A_{i,m}} + \sum_p^P \eta_{A_{i,p}} + \sum_f^F \eta_{A_{i,f}} + \sum_r^R \eta_{A_{i,ra}}}{M \cdot P_{i,m} + P \cdot C_{pl} + F \cdot P_{fe} + R \cdot P_{ra}} \quad (2.50)$$

lorsque le système comprend une seule macro-cellule et des petites cellules de type femtocellules, l'efficacité énergétique  $\gamma_{EE}(A)$  s'écrit par l'Equation (2.51) :

$$\gamma_{EE}(A) = p_{dl} * \frac{\sum_m^M \eta_{A_{i,m}} + \sum_f^F \eta_{A_{i,f}}}{M \cdot P_{m_i} + F \cdot P_{fe}} \quad (2.51)$$

en considérant la densité des nœuds, l'efficacité énergétique  $\gamma_{EE}(A)$  est donnée par l'Equation (2.52)

$$\gamma_{EE}(A) = p_{dl} * \frac{\sum_k^K \eta_{A_k}}{\sum_k^K \lambda_k A_k p_k} \quad (2.52)$$

avec  $\lambda_k$ ,  $A_k$  et  $p_k$  la densité, la surface et la puissance de densité par unité de surface du nœud de type respectivement, alors la relation (2.52) est réécrite par l'Equation (2.53)

$$\gamma_{EE}(A) = p_{dl} * \frac{\lambda_m \cdot \eta_{A_{km}} \cdot \exp(-\Omega_m) + \lambda_f \cdot \eta_{A_{kf}} \cdot \exp(-\Omega_f)}{\lambda_m \cdot A_k \cdot p_{i,m} + \lambda_f \cdot A_k \cdot p_{fe}} \quad (2.53)$$

avec  $\Omega_m = A_{k_m} (\lambda_m + \lambda_f \zeta)$ ,  $\Omega_f = A_{k_f} (\lambda_f + \lambda_m \zeta^{-1})$  où  $\zeta = \left(\frac{P_{tf}}{P_{tM}}\right)^{2/\alpha}$  représente le ratio de la puissance de transmission de la petite cellule  $P_{tf}$ , sur celle de la macro-cellule  $P_{tM}$ , et l'efficacité spectrale des cellules macro  $\eta_{A_{km}}$  et celle des petites cellules  $\eta_{A_{kf}}$ . Les paramètres,  $A_k$ ,  $A_{k_m}$ ,  $A_{k_f}$ , sont les surfaces de couverture de service du nœud de type k, des macrocellules et des petites cellules ;  $\lambda_m$  et  $\lambda_f$  les densités des macrocellules et des femtocellules respectivement.

L'efficacité énergétique du système peut être écrite en fonction du nombre de panneaux solaires et d'aérogénérateurs éoliens et l'Equation (2.42) est reformulée par l'Equation (2.54) :

$$\gamma_{EE_{DI}} = p_{dl} * \frac{\sum_k^K \eta_{A_k}}{s_0 \cdot k_0 \cdot C_{cst} + (1 - s_0)((1 - k_0)P_{gr} - E_{bb}/T)} \quad (2.54)$$

avec  $P_{gr} = v \cdot P_{PV} + w \cdot G_w$  , où  $v$  est le nombre de panneaux solaires,  $w$  est le nombre d'aérogénérateurs éoliens, et  $N_B = E_{bb}/T$  est le nombre de batterie.

En tenant compte du taux du dioxyde de carbone  $F_k$  associé à la consommation de puissance d'un nœud la métrique de l'énergie verte de télécommunications est calculée par l'Equation (2.55) :

$$\rho_g = \frac{\sum_k^K \eta_{A_k}}{\sum_k^K F_k P_k} \quad (2.55)$$

pour un système sans stockage électrochimique, en substituant (2.55) dans (2.52), l'efficacité énergétique  $\gamma_{EE_{DI}}$  , s'écrit par l'Equation (2.56)

$$\gamma_{EE_{DI}} = p_{dl} * \frac{\rho_g \cdot \sum_i^K F_k P_k}{s_0 \cdot k_0 \cdot C_{cst} + (1 - s_0)(1 - k_0)P_{gr}} \quad (2.56)$$

Le problème de la maximisation de l'EE  $\gamma_{EE_{DI}}$  , et de SE  $\eta_A$  , pour le système multi-émetteurs (nœuds) est formulé par l'Equation (2.36) :

$$\Lambda \left\{ \begin{array}{l} \max \eta_A \\ \max \gamma_{EE}(A) \end{array} \right. \quad (2.57a)$$

sous contrainte de

$$\sum_{k=1}^K P_k \leq P_{R0}^{max} \quad (2.57b)$$

$$\sum_k^K \sum_{i=1}^I \eta_{SE_{i,k}} \leq T_0^{max} \quad (2.57c)$$

$$\dots \sum_{i=1}^I p_{tM,k} \leq P_{T_{i,k}}^{max} \quad (2.57e)$$

$$\sum_{k=1}^K \sum_{i=1}^I x_{i,k}^I \leq 1 \quad (2.57f)$$

Les paramètres importants pour l'étude des systèmes sans fil sont :

la puissance consommée  $p$  par unité de surface  $A_k$  est écrite par l'Equation (2.58)

$$p = \frac{P_{T0k}}{|A_k|} \quad (2.58)$$

l'efficacité spectrale  $S^\alpha$  à  $\alpha$ -quantile est exprimée par l'Equation (2.59) :

$$S^\alpha = \frac{Q^\alpha [\eta_{SE_{i,k}}]}{|A_k|} \quad (2.59)$$

et l'efficacité énergétique  $\gamma_{EE}^\alpha$  à  $\alpha$  - quantile du système est exprimée par l'Equation (2.60) :

$$\gamma_{EE}^\alpha = \frac{S^\alpha}{p|A_k|} \quad (2.60)$$

la valeur de 5 a été utilisée pour  $\alpha$  dans cette thèse, en raison de la considération des trafics faibles en environnement semi-urbain.

## 2.4. La programmation linéaire et les méthodes de décision d'attribut multiple

La programmation linéaire (LP) [22] est un outil pour résoudre les problèmes d'optimisation linéaire. Cette méthode est une aide à la décision multicritère qui est un outil mathématique efficace pour les problèmes d'optimisation multi-objectifs. Elle permet de trancher entre plusieurs solutions alternatives et de choisir la meilleure. Cette approche est largement utilisée dans plusieurs domaines comme l'économie, la sociologie, la statistique, l'informatique, etc. L'objectif est de trouver la solution optimale une fois que le problème est modélisé sous la forme d'une fonction linéaire appelée fonction objective et d'un ensemble d'équations linéaires appelées contraintes. Des techniques et méthodes assurent la résolution du problème.

Les méthodes d'aide à la décision multi-attributs permettent d'évaluer plusieurs alternatives selon plusieurs critères conflictuels dans le but de les classer, de la première à la dernière par rapport à une solution faisable. Ces méthodes peuvent être classées en trois types à savoir : les méthodes à préférence a priori, les méthodes à préférence progressive et enfin les méthodes à préférence a posteriori.

Les méthodes à préférence a priori sont caractérisées par les préférences du décideur avant le lancement du processus de décision multicritère. A la fin de l'optimisation, la méthode est supposée fournir une décision qui traduit le mieux les préférences de l'utilisateur. Les méthodes basées sur les algorithmes génétiques (AG) en sont des exemples. Plus précisément, ils sont des procédures de recherche des paramètres basés sur les mécanismes de la génétique naturelle. Les AGs s'accommodent de manière aisée aux problèmes tels que l'incertitude, l'imprécision, la non-linéarité, et la robustesse. Les méthodes de prévision à l'aide des AGs, malgré leurs complexités sont parmi les plus performantes [22], [40].

Les méthodes à préférence progressive font intervenir le décideur tout au long de l'exécution du processus de décision. En effet, dans ce type de méthodes, le décideur est amené à spécifier ses préférences en fonction de l'évolution du processus de décision. Les méthodes interactives sont des (instances, exemples) de cette famille [22]. Les méthodes à préférence *a posteriori* font un travail au préalable, en trouvant les solutions non-dominées qui s'approchent au mieux du front de Pareto. Ensuite, le choix final est laissé au décideur, qui devra sélectionner la meilleure solution non-dominée qui correspond le mieux à ses préférences.

#### **2.4.1. Approches de résolutions analytiques par la méthode de Pareto**

Les problèmes d'optimisation peuvent présenter une famille de fonctions objectives qui n'ont pas ou ne possèdent pas un point minimum. Ces genres de problèmes n'ont pas une solution optimale ou de valeur optimale. La méthode de Pareto consiste à trouver la meilleure solution suivant les entrées d'un système. La

solution est dite optimum de Pareto, si elle est possible, et s'il n'existe aucune autre solution qui lui soit préférée au sens de Pareto [22]. La notion d'optimum de Pareto permet de diviser en deux parties, l'ensemble des solutions d'un problème multi critères (multi-objectifs). On distingue ceux qui sont améliorables ou non. La solution faisable au point  $x$  est un optimum de Pareto si la fonction image de  $x$  est un point minimal des solutions faisables de l'ensemble  $\vartheta$ . Alors la solution  $f_0(x)$  est un optimum de Pareto pour le problème d'optimisation.

Un point optimum de Pareto existe pour toute variable,  $x$ , dénoté par  $x^*(y)$  si et seulement si le point  $x^*$  est un optimum de Pareto, s'il existe uniquement (ou n'existe pas d'autre point). En fait, le point  $x$  est un optimum de Pareto s'il est une solution faisable  $f_0(x) \leq_K f_0(y) \Leftrightarrow f_0(y) \leq f_0(x)$  et pour les toutes possibilités faisables de la variable  $y$ , pour au moins une fonction objective  $f_0(x) <_K f_0(y)$ .

En d'autre terme, pour toute variable  $y$  qui est mieux que ou égale à la variable  $x$  c'est-à-dire  $f_0(y) \leq_K f_0(x)$  a exactement les mêmes valeurs objectives de  $x$ . Alors un point  $x$  est un optimum de Pareto si et seulement s'il existe une solution faisable, elle est donnée par l'Equation (2.61)

$$(f_0(x) - K) \cap \sigma = \{f_0(x)\}. \quad (2.61)$$

Un problème d'optimisation peut avoir plusieurs solutions ou des points optimums de Pareto. L'ensemble des points optimums dénoté par  $P$ , satisfait suivant l'Equation (2.62) :

$$P \subseteq v \cap bd \sigma \quad (2.62)$$

Chaque point optimum de Pareto est un point faisable qui se situe à la frontière de l'ensemble des points faisables. Les points optimums de Pareto peuvent être une solution faible de l'espace de faisabilité. Un point optimum de Pareto est proprement défini de Pareto dans la formule de Geoffrand, s'il existe  $M > 0$  de telle sorte que  $f_0(x), x \in X$ , satisfait à la condition  $f_0(x) < f_0(y)$  ainsi il existe au moins une fonction objective (solution)  $f_j(y)$  telle que  $f_0(y) < f_0(x)$  et  $M \geq \frac{f_0(y) - f_0(x)}{f_j(x) - f_j(y)}$  définie par l'Equation (2.63)

$$\min_{x \in X, \delta \geq 0} \sum_{i=1}^k \delta_i \quad (2.63)$$

dont les contraintes sont données par l'Equation (2.64)

$$f_i(x) + \delta_i = f_0(y), \quad i = 1, 2, \dots, k \quad (2.64)$$

si tous  $\delta_i = 0$ , alors  $y$  est un optimum de Pareto. Ainsi, si ce point n'est pas propre alors il est impropre.

La famille des fronts de Pareto (Pareto Set Front, PSF) [76] est l'ensemble des solutions du problème multi-objectif, si et seulement si ils existent  $a_i$  et  $b_i$  des points optimums qui forment les frontières de Pareto. Les points optimums de Pareto sont nécessairement des solutions du problème à multi-objectifs de la méthode de la programmation linéaire. Soit  $q$  une solution qui est exprimée par l'Equation (2.65)

$$q = \frac{\eta(P_{gr})}{\gamma_{EE}(P_{gr})} \quad (2.65)$$

si nous supposons que  $q^*$  est une solution optimale à laquelle on associe  $P_{gr}^*$  le point optimum, en utilisant le théorème de Dinkelbach [77], cela est vérifié par l'Equation (2.66) :

$$q^* = \frac{\eta(P_{gr}^*)}{\gamma_{EE}(P_{gr}^*)} = \max \frac{\eta(P_{gr}^*)}{\gamma_{EE}(P_{gr}^*)} \quad (2.66)$$

Le point  $P_{gr}^*$  est un point optimum de Pareto, s'il existe une solution probable pour les tous objectifs. D'après [22], le rapport entre une fonction concave et une fonction affine est une fonction concave. En utilisant le théorème de Dinkelbach [77], on montre que le problème en (2.66) est un problème d'optimisation concave et convexe qui est un problème non-linéaire et peut être transformé en un problème non paramétrique.

Le point  $(\eta(P_{gr}^*), \gamma_{EE}(P_{gr}^*))$  est un point optimum de Pareto, s'il existe une solution faisable pour au moins un objectif au (2.53) tel que  $\eta(P_{gr}) > \eta(P_{gr}^*)$  et  $\gamma_{EE}(P_{gr}) < \gamma_{EE}(P_{gr}^*)$ .



L'Equation (2.66) implique qu'on a

$$\eta(q^*) = \max[\eta(P_{gr}^*) - q^* \cdot \gamma_{EE}(P_{gr}^*)]$$

qui suggère que la valeur optimale vérifie l'Equation (2.67)

$$\eta(q^*) = \max[\eta(P_{gr}^*) - q^* \cdot \gamma_{EE}(P_{gr}^*)] = 0 \quad (2.67)$$

la condition suffisante pour que  $q^*$  soit un point optimum de Pareto, est que :

$$q^* = \frac{\eta(P_{gr}^*)}{\gamma_{EE}(P_{gr}^*)} \geq \frac{\eta(P_{gr})}{\gamma_{EE}(P_{gr})} \quad \forall P_{gr} \in \Lambda, \text{ alors on a } \eta(P_{gr}) - q^* \gamma_{EE}(P_{gr}^*) = 0$$

et  $\eta(P_{gr}) - q^* \gamma_{EE}(P_{gr}^*) \leq 0$  lorsque  $\eta(P_{gr}) - q^* \gamma_{EE}(P_{gr}^*)$  atteint la valeur maximale quand  $P_{gr} = P_{gr}^*$  et  $\max \eta(P_{gr}) - q^* \gamma_{EE}(P_{gr}^*) = 0$ .

La solution correspondante  $P_{gr}^*$  est la valeur optimale de (2.67), si seulement si  $\eta(P_{gr}) - q^* \gamma_{EE}(P_{gr}^*) = 0, \quad \forall P_{gr} \in \Lambda,$  implique que  $\eta(P_{gr}) - q^* \gamma_{EE}(P_{gr}) \leq \eta(P_{gr}^*) - q^* \gamma_{EE}(P_{gr}^*) \leq 0$  ;

$$\text{donc } \forall P_{gr} \in \Lambda, \quad q^* = \frac{\eta(P_{gr}^*)}{\gamma_{EE}(P_{gr}^*)} \quad \text{et} \quad q^* \geq \frac{\eta(P_{gr})}{\gamma_{EE}(P_{gr}^*)}$$

alors on peut conclure que le problème (2.67) a la même valeur optimale que le problème initiale (2.57a). La résolution des paramètres peut être obtenue par l'algorithme 1.

Algorithme 1: Minimisation de la consommation énergétique

1. Fixer la consommation initiale des relais  $p_{i,k}^{Tx}$
2. Fixer les index de l'itération  $T_{\max}$ , et  $t=1$  et le test d'arrêt  $\xi$
3. pour  $|EE^{(t)} - EE^{(t-1)}| < \xi$  ou  $t \leq T_{\max}$  faire
  4. 1. Mise à jour de la consommation de la macrocellule  $P_k^{(t+1)}$
  2. Faire  $t = t + 1$  et calculer  $EE^{(t+1)}$
  3. Fixer l'itération  $t = t + 1$  et choisir

La puissance de transmission de chaque nœud est exprimée par

$$q^{t+1} = \frac{\sum_{i=1}^M \sum_{k=1}^K \eta_{i,k}(P_{T_{i,k}}^t)}{(P_c + \lambda_b \cdot f_{id} \sum_{i=1}^M \sum_{k=1}^K P_{0,k}) * (P_{T_{i,k}}^t)}$$

4. Trouvez le nombre de batterie électrochimique pour 4 jours

$$N_B = \frac{(\sum_{k=1}^K n_k \cdot N_{Trx}(P_0 + \Delta P_{i,k} \cdot P_{out,i,k}) \cdot f_k + P_{Bach})}{s_0(k_o \cdot C_{cst}) + (1 - k_o)(m \cdot P_{PV} + n \cdot G_w) - \lambda_b \cdot f_{id} \sum_1^K P_{o,k}}$$

8. Fin

### 2.4.2. Méthode analytique du taux de l'injection des énergies renouvelables

Le taux d'injection des énergies renouvelables est exprimé par l'Equation (2.68) :

$$P_{gr} = \frac{1}{T} \left[ \frac{T \cdot (P_{To})}{(1 - s_0)(1 - k_0)} - \frac{T \cdot s_0 k_o \cdot C_{cst}}{(1 - s_0)(1 - k_0)} - \frac{E_{bb}}{(1 - s_0)(1 - k_0)} \right] \quad (2.68)$$

En supposant que  $s_0 = 1$ , cela implique la source principale est active. Il en découle que la puissance des sources d'énergie renouvelable injectée tend vers une valeur infinie. Par conséquent, le choix d'un ratio optimal de  $k_0$ , ne sera pas important.

Lorsque  $s_0 = 0$  ; cela implique la source principale est hors tension, alors on a l'Equation (2.69) :

$$P_{gr} = \frac{T \cdot (P_{To}) - E_{bb}}{T * (1 - s_0)(1 - k_0)} \quad (2.69)$$

la valeur optimale de  $k_0$ , doit être proche de 1 pour que la valeur injectée des énergies renouvelables soit infinie mais cela dépend de la charge. Cependant, lorsque la décision est d'utiliser au maximum l'énergie renouvelable ensemble avec une autre source d'énergie d'origine thermique, alors la puissance des énergies renouvelables  $P_{gr}$  est donnée par l'Equation (2.70):

$$P_{gr} = \frac{T \cdot (P_{To}) - E_{bb} - T \cdot s_0 \cdot k_o \cdot C_{cst}}{T * (1 - k_0)} \quad (2.70)$$

La valeur optimale des énergies renouvelables peut être obtenue par la méthode de l'Hôpital, et exprimée par l'Equation (2.71) :

$$\frac{d(P_{gr})}{dk_0} = \frac{d}{dk_0} \left( \frac{T \cdot (P_{To}) - E_{bb} - T \cdot s_0 \cdot k_o \cdot C_{cst}}{T * (1 - k_0)} \right) \quad (2.71)$$

Il s'en suit l'Equation (2.72)

$$\frac{d(P_{gr})}{dk_0} = \left( \frac{T \cdot (P_{To}) - E_{bb} - T \cdot s_0 \cdot C_{Cst}}{-T} \right) \quad (2.72)$$

les valeurs extrêmes sont obtenues par un calcul de limite établi par l'Equation (2.73) :

$$\lim_{1/T \rightarrow 0} \frac{d(P_{gr})}{dk_0} = \lim_{X \rightarrow \infty} \left( \frac{1/X \cdot (P_{To}) - E_{bb} - 1/X \cdot s_0 \cdot C_{Cst}}{-1/X} \right) \quad (2.73)$$

et par l'Equation (2.74)

$$\lim_{T \rightarrow \infty} \frac{d(P_{gr})}{dk_0} = \lim_{T \rightarrow \infty} \left( \frac{T \cdot (P_{To}) - E_{bb} - T \cdot s_0 \cdot C_{Cst}}{-T} \right) = s_0 \cdot C_{Cst} - P_{To} \quad (2.74)$$

Ce résultat est indépendant du ratio de  $k_0$ , qui implique que le taux injecté des énergies renouvelables dans un système de télécommunications n'est pas important au contraire, c'est le temps d'utilisation qui reste le facteur primordiale donc  $p_{dl}$  la probabilité de la transmission en liaison descendante. Cela explique la nécessité de la disponibilité de la source d'énergie renouvelable.

## 2.5. Etude analytique du taux de l'injection des énergies renouvelables et de la prédiction par l'intelligence artificielle

Cette section présente les réseaux de neurones comme un outil d'optimisation a priori pour évaluer la disponibilité de l'énergie verte pour des milieux à accès difficile à partir des données temporelles aléatoires : la vitesse du vent et l'insolation solaire.

### 2.5.1. Prédiction de l'irradiation solaire par les réseaux de neurone artificiels

Les réseaux de neurones artificiels (RNA) appartiennent à la science de l'intelligence artificielle qui trouvent des applications dans les domaines de l'optimisation et de la prédiction de quantités ou de variables aléatoires. Les RNA sont utilisés dans diverses applications pour résoudre des problèmes complexes liés

à la reconnaissance et à la prédiction de séries temporelles. Leur utilisation permet d'obtenir des résultats à minima d'erreurs [58]. Les RNA ont une capacité de traitement et de réaction proche du cerveau humain, ils reposent sur un processus d'apprentissage. Une étude comparative incluant des RNA pour l'estimation de l'irradiation solaire a été effectuée dans la référence [126], et des résultats satisfaisants avec des erreurs très faibles ont été reportées. La prédiction de l'irradiation solaire par les RNA a été utilisée pour des localités à accès difficile [5]. On note aussi l'utilisation des RNA pour la prédiction de la vitesse du vent [53], [111], [113], [114], [121]. La logique floue et le neuroflou sont utilisés dans les références [110] et [113].

Le choix de la configuration du modèle a utilisé est également important et de même l'algorithme de traitement. En effet, la prédiction de la charge énergétique sur le réseau de la Communauté Electrique du Bénin (CEB) a également été effectuée, où il s'est avéré que la configuration perceptron multicouche (MLP) donne de meilleur résultats que la configuration à base de fonctions radiales (RBF) [115].

### **2.5.2. Les réseaux de neurones biologiques**

Les réseaux de neurones sont un courant de l'intelligence artificielle. Leur modèle de développement est calqué sur des algorithmes d'apprentissage analogue à un modèle simplifié du cerveau humain. Un réseau de neurone est décrit par ses composants, variables descriptives ; et les interactions des composants. Un neurone artificiel se comporte comme un processeur élémentaire [79]. Il reçoit un nombre variable d'entrées en provenance de neurones amonts. A chacune de ces entrées est associé un poids  $w$  représentatif de la force de la connexion. Chaque processeur élémentaire est doté d'une sortie unique, qui se ramifie ensuite pour alimenter un nombre variable de neurones avals.

Un neurone artificiel reçoit l'information provenant des entrées  $x_i$  ( $i = 1, 2, \dots, n$ ) par l'intermédiaire des connexions auxquelles on affecte individuellement un

pois  $w_{j,i}$  pondérant l'information reçue, appelé le poids synaptique. La modélisation mathématique est donnée dans la Figure : 2.3.

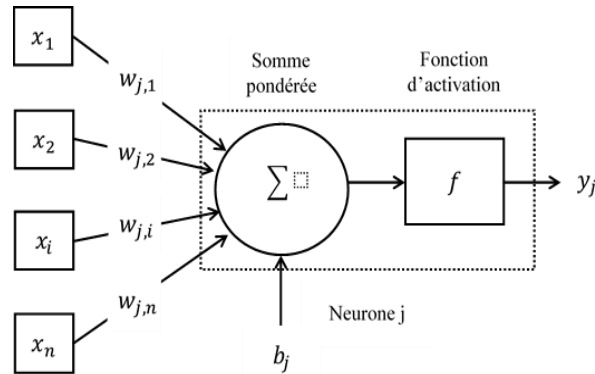


Figure 2. 3: Représentation d'un neurone mathématique avec  $x_i$ ,  $y_j$ ,  $b_j$  et  $w_{j,i}$  les entrées, la sortie, le biais et les poids synaptiques

Le fonctionnement d'un neurone biologique contient deux étapes :

- dans la première phase représente le prétraitement des données reçues en calculant le potentiel  $v_j$  du neurone  $j$  par l'Equation (2.75) :

$$v_j = b_j + \sum_{i=1}^n w_{j,i} x_j \quad (2.75)$$

où  $w_{j,i}$  désigne le poids de la connexion liant le neurone  $j$  à l'entrée  $i$ , et  $b_j$  est un terme constant appelé biais qui peut être considéré comme le poids d'une entrée  $x_0$  égale à 1. La sortie  $v_j$  peut-être exprimée par l'Equation (2.76) :

$$v_j = \sum_{i=0}^n w_{j,i} x_j \quad (2.76)$$

- dans la deuxième phase, une fonction de transfert  $f$  appelée également fonction d'activation qui calcule la valeur de l'état interne  $y_j$  du neurone  $j$  à partir de la valeur du potentiel  $v_j$ . Cette valeur désigne la sortie du neurone qui est écrite par l'Equation (2.77) :

$$y_j = f(v_j) = f\left(\sum_{i=0}^n w_{j,i} x_j\right) \quad (2.77)$$

Il y a en général deux configurations des réseaux artificiels de neurones (RNA) qui sont les plus utilisées [115] la configuration à base de la fonction radiale (RBF) et celle des couches multiples à perceptron (MLP).

### 2.5.3. La prédiction de la vitesse du vent par les 'Support Vector Regression' (SVR)

Les *Support Vector Régression* (SVR) sont une adaptation des machines à vecteurs support ou séparateurs à vaste marge, (*Support Vector Machines*, SVM) au problème de régression [91]. Les SVM et les SVR sont une classe d'algorithmes d'apprentissage supervisé, basés sur les mêmes principes que les réseaux de neurones. Ils sont basés sur la recherche de l'hyperplan, de marge optimale qui, lorsque c'est possible, classe ou sépare correctement les données tout en étant le plus éloigné possible de toutes les observations. L'utilisation des SVM autant dans l'optimisation pour la classification ; que pour les algorithmes de régression consiste à déterminer les multiplicateurs optimaux de Lagrange.

Le principe est donc de trouver un classifieur, ou une fonction de discrimination, dont la capacité de généralisation (qualité de la prévision) est la plus grande possible.

Le modèle du classifieur est construit à partir d'un ensemble d'apprentissage de  $N$  exemples étiquetés  $(x_i, y_i)$  avec  $x_i \in N^P$  et  $y_i \in \{1; -1\}$  selon la classe ( $P$  représente la dimension des vecteurs d'entrée ou encore le nombre de caractéristiques dans les exemples d'entrées).

L'apprentissage permet, dans le cas où les exemples sont linéairement séparables, de construire la fonction  $f$  de décision appelée aussi hyperplan séparateur de la forme définie par l'Equation (2.78)

$$f(x) = \text{sign}(\langle w, x \rangle + b) \quad (2.78)$$

avec  $w \in N^P$  et  $b$  les paramètres permettant de déterminer dans quelle partie de l'hyperplan se trouve l'exemple  $\chi$ . La Figure 2.4 présente le cas linéairement séparable, où la marge  $\Delta$  est définie par la distance minimale entre les deux points des différentes classes.

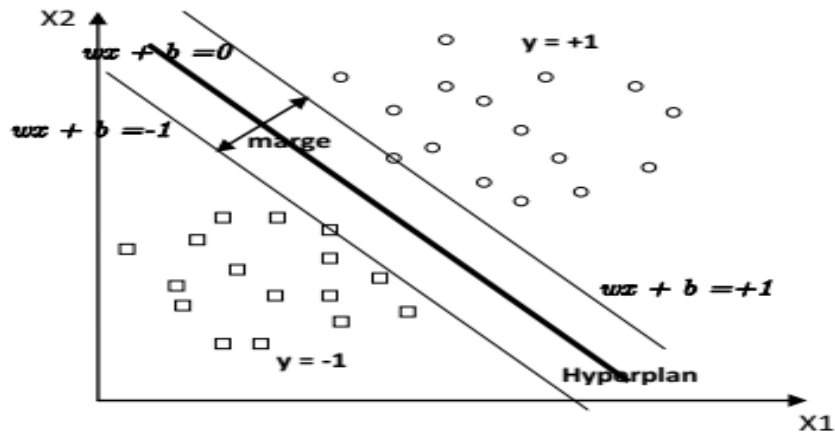


Figure 2. 4 Hyperplan linéaire séparant avec la marge  $\Delta$  les différentes classes

Le principe des SVM est repris et adapté par les SVR pour modéliser un problème de régression. Le but est d'approximer un ensemble de données  $(x_i, y_i)$  par une fonction  $f$  sous la forme donnée par l'Equation (2.79) :

$$f(x) = \langle w, x \rangle + b \quad (2.79)$$

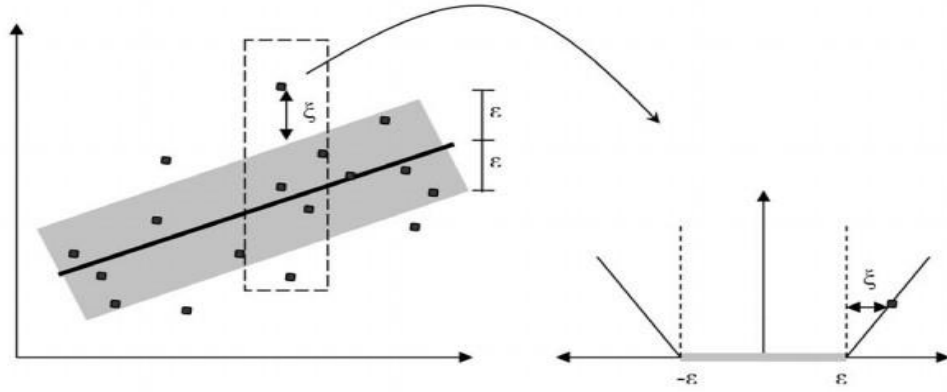
telle que l'erreur soit exprimée par l'Equation (2.80)

$$|f(x) - y_i| \leq \delta \quad (2.80)$$

avec  $i \in \{1, \dots, N\}$ .

L'idée consiste à minimiser le terme  $w$  tout en étant sous la contrainte de ne pas dépasser un taux d'erreur  $\delta$ . Du point de vue graphique, cela revient à trouver une zone du plan qui contient tous les exemples  $x_i$  de largeur  $2\delta$  appelé tube voir Figure 2.5. Si on considère la minimisation de  $\|w\|^2$  on obtient le problème d'optimisation quadratique de l'Equation (2.81) :

$$\begin{cases} \min \left\{ \frac{1}{2} \|w\|^2 \right. \\ \left. \text{avec } \begin{cases} y_i - w^T x_i - b \leq \varepsilon \\ w^T x_i + b - y_i \leq \varepsilon \end{cases} \right. \end{cases} \quad (2.81)$$


 Figure 2. 5:  $\delta$  – *insensible*

Cette description du problème considère donc qu'une fonction linéaire  $f$  qui approche tous les exemples avec une précision  $\delta$  existe. Dans la pratique, ce n'est pas toujours le cas. En présence de valeurs aberrantes, il est aussi plus important d'autoriser certaines erreurs. Dans ce cas, le concept de marge souple est utilisé. Il consiste à introduire des variables de relâchement  $\xi_i$ , et  $\xi_i^*$  pour rendre faisables les contraintes du problème d'optimisation comme dans l'Equation (2.82)

$$\begin{cases} \min \left\{ \frac{1}{2} \|w\|^2 + C \sum_{i=1}^n (\xi_i + \xi_i^*) \right. \\ \left. \text{avec } \begin{cases} y_i - w^T x_i - b \leq \varepsilon + \xi_i \\ w^T x_i + b - y_i \leq \varepsilon + \xi_i^* \end{cases} \right. \end{cases} \quad (2.82)$$

avec  $\xi_i$  et  $\xi_i^*$  représentant respectivement les erreurs positives et négatives. La constante  $C > 0$  est un hyper paramètre permettant de régler le compromis entre l'erreur autorisée et la platitude de la fonction  $f$ . Cette formulation du problème revient à utiliser une fonction d'erreur  $|\zeta|_\delta$  appelée  $\delta$  – *insensible* comme dans l'Equation (2.83) :

$$|y - f(x)|_\varepsilon = \begin{cases} 0, \forall |y - f(x)| \leq \varepsilon \\ |y - f(x)| - \varepsilon, \quad \text{pour } |y - f(x)| > \varepsilon \end{cases} \quad (2.83)$$

On peut interpréter cette fonction comme créant un tube d'insensibilité de rayon  $\delta$  autour de la fonction  $f(x)$ . Les variables  $\xi_i$  et  $\xi_i^*$  représentent alors la distance selon l'axe  $y$  entre le point  $(x_i, y_i)$  et le bord du tube.



En passant par la formulation duale et l'équation de Lagrange, la fonction obtenue peut être écrite sous la forme :

$$f(x) = \sum_{i=1}^n (\alpha_i + \alpha_i^*) x_i^T \cdot x + b \quad (2.84)$$

avec  $\alpha_i$  et  $\alpha_i^*$  les multiplicateurs de Lagrange issus de la formulation duale.

Si l'on introduit une fonction noyau dans le produit scalaire, cela induit une transformation non linéaire des données vers un espace intermédiaire de plus grande dimension. Par conséquent (2.84) devient linéaire et est exprimé par l'Equation (2.85) :

$$f(x) = \sum_{i=1}^n (\alpha_i + \alpha_i^*) \cdot k(x_i, x) + b \quad (2.85)$$

#### 2.5.4. Les indicateurs de statistiques

Les indicateurs sont importants, pour évaluer les modèles d'optimisation a priori tels que les algorithmes de prédictions, de planifications et d'optimisations. Ces indicateurs statistiques sont l'erreur moyenne absolue en pourcentage (MAPE), la racine carrée de l'erreur quadratique moyenne (RMSE), le RMSE normalisé (NRMSE) et le coefficient de corrélation (R).

##### 2.5.4.1. L'erreur moyenne absolue en pourcentage

L'erreur moyenne absolue en pourcentage ou pourcentage d'erreur absolue moyen (Mean Absolute Percentage Error, MAPE) est dans l'ensemble une mesure de la justesse de la prévision. Une valeur de MAPE inférieure à 10% est considérée comme acceptable, et calculée par l'Equation (2.86).

$$MAPE = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N \left| \frac{x_i(i) - x_{pre}(i)}{x_{pre}(i)} \right| \times 100 \quad (2.86)$$

Les grandeurs intervenantes dans les différentes équations sont :

$N$  : Nombre d'exemple utilisé dans la base d'entraînement ou de test ;

$x_i(i)$  : la grandeur mesurée ;

$x_{pre}(i)$  : la grandeur prédite par le modèle de prédiction ;

$\overline{x_i(i)}$  : la valeur moyenne de la grandeur mesurée ;

$\overline{x_i(i)}$  : la valeur moyenne de la grandeur prédite.

#### 2.5.4.2. L'erreur quadratique moyenne

L'erreur quadratique moyenne (Root Mean Square Error, RMSE), identifie la performance du modèle en comparant l'écart entre les valeurs obtenues lors de la prédiction et celles des données mesurées. C'est une grandeur toujours positive, et est obtenue par l'Equation (2.87):

$$RMSE = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (x_i(i) - x_{pre}(i))^2} \quad (2.87)$$

L'erreur quadratique moyenne est très utile pour comparer les différentes approches. Cet indicateur montre qu'un modèle est bon quand sa valeur est très proche de 0. Il faut ajouter que la racine carrée de l'erreur quadratique moyenne normalisée (Normalised-RMSE), est également utilisée, et exprimée par l'Equation (2.88) :

$$NRMSE = \frac{\sqrt{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (x_i(i) - x_{pre}(i))^2}}{\max(RMSE) - \min(RMSE)} \quad (2.88)$$

### 2.5.4.3. Le coefficient de corrélation (R)

Le coefficient de corrélation mesure combien les valeurs prédites se rapprochent des valeurs réelles. Une valeur du coefficient de corrélation plus proche de l'unité (1) implique une meilleure prédiction. Ce coefficient est calculé par l'Equation (2.89) :

$$R = 1 - \frac{\sum_{i=1}^N (x_i(i) - \overline{x_i(l)}) \times (x_{pre}(i) - \overline{x_{pre}(l)})}{\sqrt{\left[ \sum_{i=1}^N (x_i(i) - \overline{x_i(l)})^2 \right] \times \left[ \sum_{i=1}^N (x_{pre}(i) - \overline{x_{pre}(l)})^2 \right]}} \quad (2.89)$$

### 2.5.4.4. Le coefficient de détermination (R<sup>2</sup>)

Le coefficient de détermination, R<sup>2</sup>, est une mesure statistique indiquant la manière dont la droite de régression ajuste les données réelles. Cet indicateur varie entre 0 et 1. Une valeur de 1 indique un parfait accord entre le modèle théorique et les données mesurées, alors que la valeur 0 indique un total désaccord. Ce coefficient est calculé par l'Equation (2.90) :

$$R^2 = 1 - \frac{\sum_{i=1}^N (x_i(i) - x_{pre}(i))^2}{\sum_{i=1}^N (x_i(i))^2} \quad (2.90)$$

Les caractéristiques d'une variable aléatoire x sont exprimées dans les Equations 2.91-2.96 qui définissent les paramètres statistiques tels que :

Moyenne ( $\mu$ )	$\mu = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N x_i$	(2.91)
-------------------	--------------------------------------	--------

Ecart-type ( $\sigma$ )	$\sigma = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (x_i - \mu)^2}$	(2.92)
-------------------------	--	--------

Coefficient de variation (CV)	$CV = \frac{\sigma}{\mu}$	(2.93)
-------------------------------	---------------------------	--------

Coefficient d'aplatissement (Kurtosis, k)	$k = \frac{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (x_i - \mu)^4}{\sigma^4}$	(2.94)
---	---	--------

$$\text{Coefficient d'asymétrie (Skewness, } sk) \quad sk = \frac{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (x_i - \mu)^3}{\sigma^3} \quad (2.95)$$

$$\text{L'erreur quadratique moyenne (E)} \quad E = \frac{1}{2} \sum_{i=1}^N (x_i - d_i)^2 \quad (2.96)$$

## 2.6. Conclusion

Dans ce chapitre la méthode de la programmation linéaire a été utilisée pour le problème de l'optimisation a priori de l'intégration des énergies renouvelables et de la quantification de la consommation énergétique des nœuds sous la contrainte de la maximisation du débit dans un réseau cellulaire hétérogène. Les méthodes d'optimisation a priori sont des outils d'aide à la planification mais elles n'entreprennent pas de correction dynamique. Elles relèvent de l'optimisation classique, généralement connue, des méthodes d'analyses numériques. Cependant les méthodes d'optimisation a posteriori, sont des méthodes dynamiques prenant à la fois plusieurs paramètres de décision qui sont du ressort des domaines de l'intelligence artificielle et peuvent s'auto-configurer.

Les techniques d'optimisation de la consommation d'énergie dans les réseaux de télécommunications sont présentées, particulièrement les réseaux sans fils avec cas d'un réseau cellulaire à cellules hétérogènes. Le concept d'intégration des énergies renouvelables est également exposé par une approche scientifique. L'efficacité énergétique et spectrale sous contrainte de la maximisation du débit sont formulées par un problème d'optimisation à multi-objectifs avec injection des énergies renouvelables. L'introduction de l'énergie renouvelable disponible ou verte (le potentiel énergétique du soleil et du vent) a été modélisée dans le but de mieux comprendre le comportement du réseau d'accès spécifiquement les stations de base. Cependant au regard de leur intermittence les techniques de l'intelligence artificielles telles que les réseaux de neurones artificiels et de la machine à support de vecteurs ont été utilisés pour une évaluation à court terme de leur disponibilité.

## **Chapitre 3 : Les résultats et discussions des contributions**

### **3.1. Introduction**

L'approche d'intégration des énergies renouvelables dans les systèmes de communication repose énormément sur la disponibilité de la ressource renouvelable. La prédiction du potentiel des ressources renouvelables est réalisée par le modèle des réseaux de neurone artificiel (RNA) suivant les conditions climatiques. Cette optimisation a priori est évaluée par des critères de performances.

Le déploiement des cellules à faible puissance est prisé pour les technologies cellulaires de futures générations. Cependant, le nombre optimum de petites cellules qui doit graviter autour d'une macro-cellule reste le challenge.

Dans ce chapitre, les résultats obtenus sont présentés et discutés de la façon séparée. L'optimisation a priori de la disponibilité de la source renouvelable a été examinée par l'utilisation d'un réseau de neurone artificiel pour le cas de l'irradiation solaire, puis la méthode de régression avancée a été utilisée pour quantifier la ressource du vent. Ensuite, le dilemme de l'efficacité énergétique et le spectre est étudié dans l'objectif d'optimiser la consommation énergétique du système sous contrainte de la maximisation du débit par un déploiement optimal du nombre de petites cellules avec cas des femto-cellules. Enfin l'optimisation de la consommation d'énergie en fonction du modèle de propagation a été proposé pour quelques villes.

### **3.2. Contribution à l'optimisation a priori de l'intégration des ressources renouvelables**

Cette section présente les résultats sur la prédiction des énergies renouvelables par l'utilisation des réseaux de neurones artificiels et de la machine à support de vecteurs.

### 3.2.1. Implémentation du model de prédiction des potentiels énergétique

Les résultats des modèles de prédiction sont présentés et analysés dans cette section.

#### 3.2.1.1. Le synoptique du système de réseau de neurones artificiels

Le synoptique est représenté à la Figure 3.1.

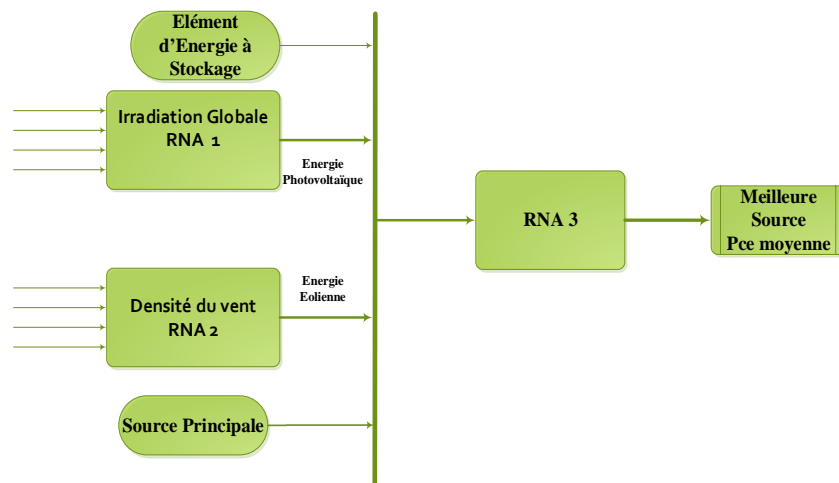


Figure 3. 1: Synoptique du système par réseau de neurone

Le RNA (ANN1) est un réseau neural perceptron à multiple couche accessible par le fonction 'ntstool' dans l'environnement de Matlab. Son rôle est d'anticiper la disponibilité de l'énergie photovoltaïque par une prédiction de l'irradiation globale. Le RNA (ANN2) s'en charge de la prédiction des paramètres devant concourir à la disponibilité de la puissance éolienne (l'énergie éolienne). Ce RNA est un SVR où la fonction 'svmclassify' a été utilisée qui exploite les résultats de 'svmtrain'. Le RNA (ANN3) est un réseau multicouche perceptron (MLP) a pour but de déterminer la meilleure combinaison des sources d'origine renouvelable disponible sur le site s'appuyant sur le critère statistique de corrélation entre les données mesurables, la chute de tension sur le bus continu, et la résistivité (résistance) de la prise terre. Le niveau de l'énergie de stockage par une optimisation du nombre d'aérogénérateur nécessaire et le nombre de panneau solaire. Ce système est destiné à faire la gestion intelligente des sources d'alimentation. Dans cette thèse, le critère de la corrélation a été utilisé.

### 3.2.1.2. Le logiciel Matlab

Le logiciel laboratoire de matrices (Matrix Laboratory, MatLab) est un laboratoire virtuel. C'est ce logiciel qui a été intensément utilisé dans cette thèse comme environnement de simulation, de prédiction, et d'optimisation. Le logiciel MatLab contient des collections de fonctions qui étendent l'environnement Matlab pour résoudre des catégories spécifiques de problèmes [89].

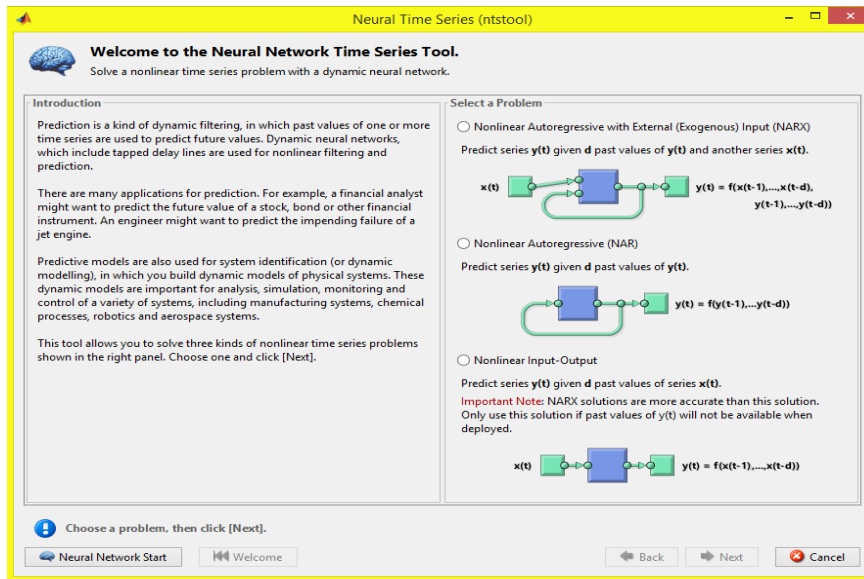


Figure 3. 2: Interface principale de la ntstool de MATLAB

Ces atouts sont multiples, c'est une multiplateforme de traitement de données sans limitation de taille, interface graphique et langage intuitif, gains de temps de CPU, Toolboxes. Ainsi la boîte à outil « nntool » permet de créer des modèles à base de réseaux de neurones. La boîte à outil 'toolbox' « ntstool » (Figure 3.2-3.3) met à la disposition de l'utilisateur un modèle prédéfini et modifiable selon les besoins. Les modèles de réseaux de neurones construits sont de type feedforward à deux couches. Les neurones de la couche cachée possèdent une fonction d'activation de type sigmoïde pour la première approche (MLP), et gaussienne pour la deuxième approche (RBF) et ceux de la couche de sortie qui produit une fonction linéaire dans les deux cas (Figure 3.3).



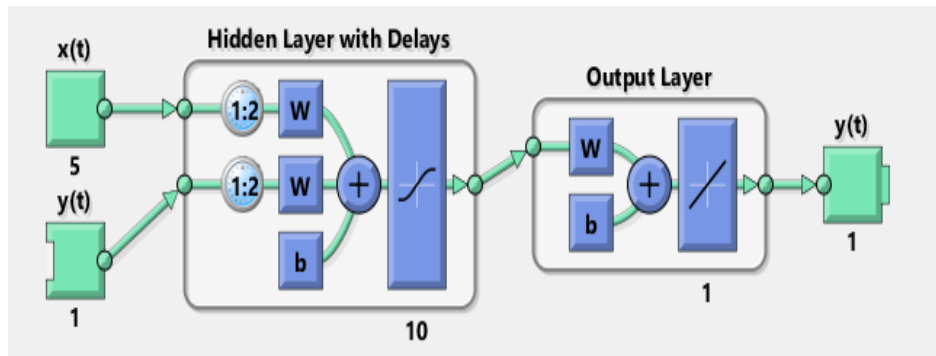


Figure 3. 3: Schéma synoptique de l'architecture des modèles de réseau de neurones avec dix neurones sous la couche cachée

L'étape de prétraitement est important pour la précision du modèle, afin de choisir des paramètres d'entrée adéquats car elle permet d'éliminer certaines variables qui fournissent très peu ou pas d'information pour décrire la sortie, ou encore d'éliminer des variables redondantes.

### 3.2.2. Méthodologie de la collecte des mesures et de la configuration des modèles de la prédiction de l'irradiation solaire

Les données recueillies à la station météorologique de Lomé sont traitées dans Microsoft Excel et sauvegardées comme des fichiers .csv avant leur utilisation dans MatLab. Elles sont données dans les Tableaux 3.1 et 3.2. Les configurations utilisées sont consignées dans le Tableau 3.3, et la Figure 3.11 montre le modèle du réseau de neurones artificiels. Les deux types de modèles testés sont le multicouche perceptron (MLP) et la fonction radiale de base (RBF).

Tableau 3. 1 Corrélation entre l'irradiation solaire et chacune des variables

Acronyme	Description	Corrélation
Tmoy	Température moyenne	0,7508
Tmin	Température minimale	0,0925
Tmax	Température maximale	0,7532
$\Delta T$	Ecart de température	0,6072
Patm	Pression atmosphérique	0,4675

Acronyme	Description	Corrélation
Hu	Humidité relative	0,5500
$S_0$	Insolation	0,3953
H	Irradiation au-dessus de l'atmosphère	0,0709
T	Température du point de rosée	0,0689
$\delta$	Déclinaison	0,4250
$\omega_0$	Hauteur angulaire maximale du soleil	0,4675

Le Tableau 3.2 donne les caractéristiques statistiques des séries des données journalières.

Tableau 3. 2: Caractéristiques statistiques des séries de données journalières

	Moyenne	Ecart-type	Coefficient de variation	Coefficient d'aplanissement	Coefficient de d'asymétrie	Minimum	Maximum
Pression atmosphérique	99,87	0,91	0,01	1,67	0,12	98,07	101,60
Température moyenne	26,18	1,75	0,07	4,88	1,22	20,85	35,10
Ecart de température	7,48	3,68	0,50	3,23	1,05	1,11	20,33
Température maximale	30,13	3,17	0,11	3,09	0,91	23,62	42,17
Humidité relative	69,76	22,97	0,33	3,66	-1,42	6,36	92,12
GHI	5,31	1,13	0,22	4,75	-1,16	0,24	7,92

Les différentes configurations sous les contraintes climatiques sont montrées dans le Tableau 3.3 pour la conception du modèle de l'irradiation pouvant être utilisé sur les sites à accès difficile.

Tableau 3. 3 Les différents modèles utilisés pour l’entraînement du réseau de neurone pour la prédiction de l’irradiation solaire

Modèles	Variables d’entrées							
	$\delta$	$S_0$	$\omega_0$	Patm	$T_{moy}$	$\Delta T$	$T_{max}$	Hu
1	X	X	X	X	X	X	X	X
2					X	X	X	X
3		X	X	X	X	X	X	X
4	X		X	X	X	X	X	X
5	X	X		X	X	X	X	X
6	X	X	X		X	X	X	X
7			X	X	X	X	X	X
8	X			X	X	X	X	X
9	X	X			X	X	X	X
10		X		X	X	X	X	X
11		X	X		X	X	X	X
12	X		X		X	X	X	X
13				X	X	X	X	X
14	X				X	X	X	X
15		X			X	X	X	X
16			X		X	X	X	X

### 3.2.3. Résultats sur la prédiction de l’irradiation solaire

Les compilations des indicateurs statistiques des différentes configurations par rapport aux conditions climatiques sont données dans le Tableau 3.4.

Tableau 3. 4 Performances des différentes configurations

Modèle	Perceptron Multicouche (MLP)				Fonction Radiale de Base (RBF)			
	Nbre° de neurone	MAPE (%)	RMSE	R <sup>2</sup>	Nbre° de neurone	MAPE (%)	RMSE	R <sup>2</sup>
1	15	3,8783	0,249	0,9247	19	4,5700	0,286	0,9070
2	15	3,4882	0,231	0,9328	16	4,9872	0,321	0,8616
3	8	3,4753	0,234	0,9295	26	4,4743	0,291	0,9023
4	5	3,5719	0,227	0,9323	19	4,4982	0,284	0,9036
5	10	3,495	0,229	0,929	26	4,382	0,276	0,909

Modèle	Perceptron Multicouche (MLP)				Fonction Radiale de Base (RBF)			
	Nbre° de neurone	MAPE (%)	RMSE	R <sup>2</sup>	Nbre° de neurone	MAPE (%)	RMSE	R <sup>2</sup>
6	4	3,787	0,245	0,919	22	4,427	0,277	0,91
7	2	3,790	0,241	0,928	10	4,543	0,293	0,895
8	<b>8</b>	<b>3,277</b>	<b>0,216</b>	<b>0,933</b>	<b>11</b>	<b>4,089</b>	<b>0,267</b>	<b>0,912</b>
9	6	3,376	0,216	0,929	15	4,434	0,28	0,903
10	10	3,614	0,233	0,931	16	4,257	0,268	0,916
11	3	3,871	0,251	0,923	12	4,323	0,295	0,879
12	6	3,849	0,248	0,915	14	4,464	0,282	0,906
13	5	3,421	0,225	0,925	25	5,035	0,334	0,863
14	12	3,431	0,235	0,921	18	4,136	0,26	0,91
15	6	3,61	0,237	0,936	18	4,375	0,28	0,905
16	2	3,807	0,249	0,915	12	4,734	0,296	0,894

La configuration 8 à couches multiple perceptron présente les meilleures performances comparées aux autres (voir Figure 3.4). La configuration 11 à fonction de base radiale 11 a également une bonne performance cependant mais très faible par rapport au modèle 8 à couche multiple perceptron. Le modèle développé à la configuration 8 à couche multiple perceptron a été retenu pour application sur des sites où les données sont difficiles à collecter.

La compilation des différents modèles examinés est donnée dans la Figure 3.4 par rapport au MAPE. Le modèle 8 du MLP reste dominant. Ce modèle est appliqué sur un site (voir Figure 3.5) qui n'était pas dans les sites ayant fait l'objet de l'apprentissage.

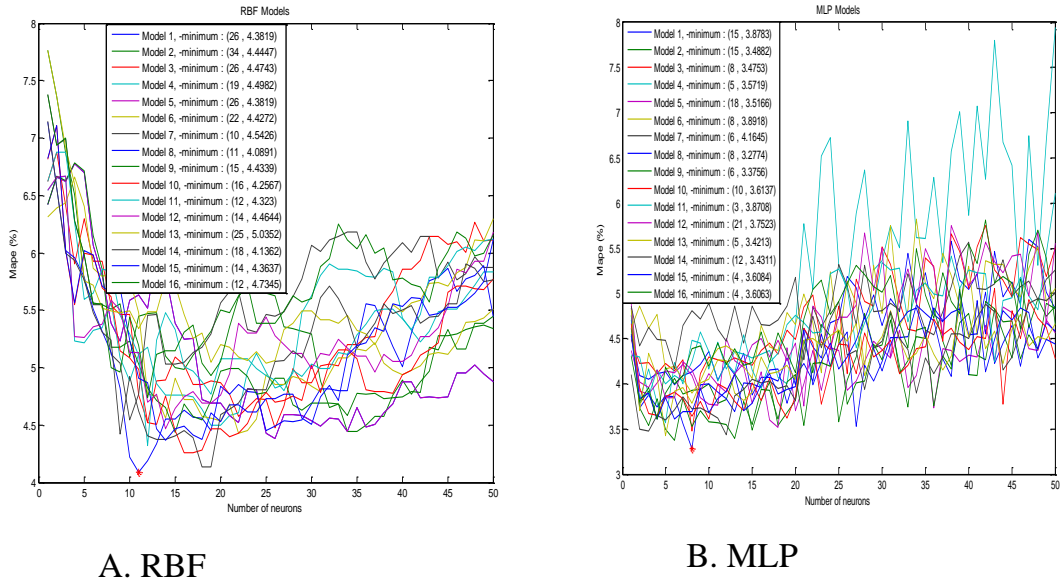


Figure 3. 4: Performance comparative des modèles RBF et MLP

Dans une politique à l'accès universel conjuguée à une utilisation des énergies renouvelables, le développement de ce modèle de prédiction est nécessaire pour les sites à accès difficile.

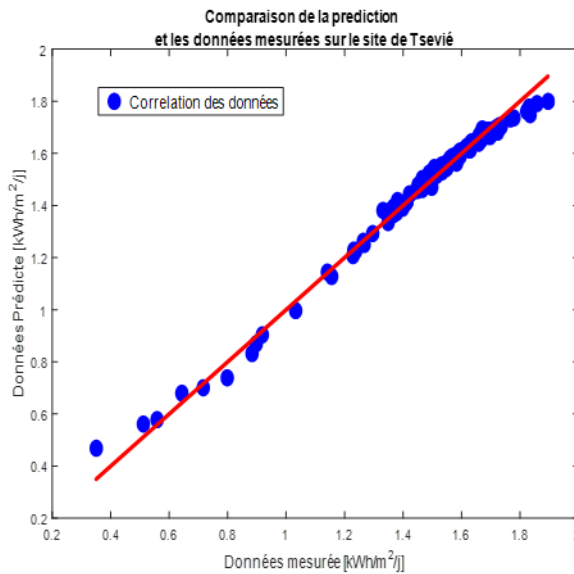


Figure 3. 5: Prédiction de l'irradiation solaire sur plan incliné cas du site de Lomé

L'analyse des résultats de la Figure 3.5, montre que la réponse du modèle de prédiction est légèrement au-dessus des données observées. Par contre dans la Figure 3.6, les résultats de la prévision sur le site de Lomé sont légèrement supérieurs aux données recueillies.

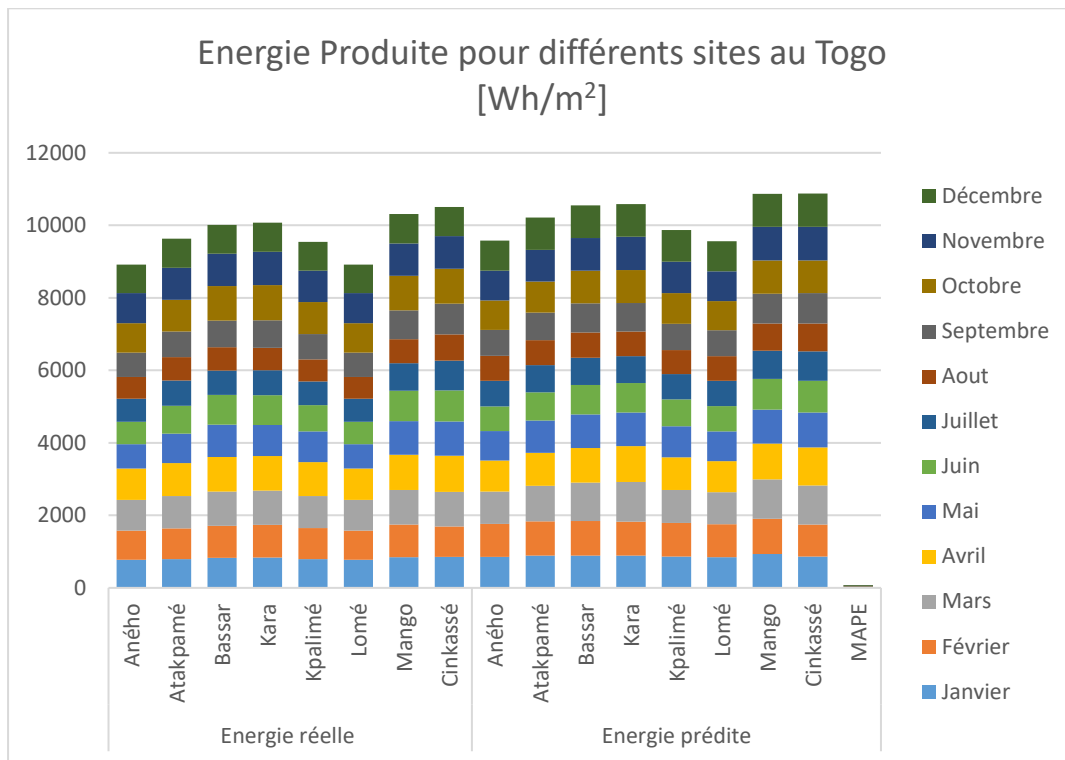


Figure 3. 6: Production annuelle sur quelques sites

Les résultats comparatifs de la Figure 3.6 montrent la potentialité de l'énergie photovoltaïque susceptible d'être récupérée sur les sites. La forte production électrique d'origine solaire est espérée dans la partie septentrionale cas de Mango et Cinkassé.

### 3.2.4. Méthodologie de collecte des mesures et la configuration des modèles de prédiction de la vitesse du vent par le SVM

Les données recueillies à la station météorologique de Lomé sont traitées avant leur utilisation. Elles sont données dans le Tableau 3.5. Les configurations utilisées sont consignées dans le Tableau 3.6.

Tableau 3. 5. Description statistique des données

<b>Variables</b>	<b>Code</b>	<b>Max.</b>	<b>Moyenne</b>	<b>St. dev.</b>	<b>Skewness</b>	<b>Kurtosis</b>
Densité du vent	WSD	56,16	54,96	1,2	0,262	2,33
Vitesse du vent	SPED	6	3,528	1,906	-0,027	0,034
Pression atm.	ALTM	1019	1011,906	2,224	-0,038	-0,450
Temp. de rosée	DWPC	36	24,285	2,770	-3,450	17,019
Temp. ambiante	TMPC	37	27,953	27,953	0,064	-0,428

Tableau 3. 6. Les différentes configurations d'entrées

<b>Modèle</b>	<b>Vecteurs d'entrée</b>
<b>1</b>	[SPED(t-2), SPED(t-1), TMPC(t-1), ALTM(t-1), DWPC(t-1)]
<b>2</b>	[SPED(t-1), TMPC(t-1), ALTM(t-1), DWPC(t-1)]
<b>3</b>	[SPED(t-1), TMPC(t-1), ALTM(t-1)]
<b>4</b>	[SPED(t-1), TMPC(t-1), DWPC(t-1)]
<b>5</b>	[SPED(t-1), ALTM(t-1), DWPC(t-1)]
<b>6</b>	[SPED(t-2), SPED(t-1), TMPC(t-1), DWPC(t-1)]
<b>7</b>	[SPED(t-2), SPED(t-1), ALTM(t-1), DWPC(t-1)]
<b>8</b>	[SPED(t-2), SPED(t-1), TMPC(t-1), ALTM(t-1)]

### 3.2.5. Les résultats sur la prédiction de la vitesse du vent par le SVM

Les compilations des différentes configurations par rapport aux conditions climatiques sont données le Tableau 3.7 où les meilleures performances sont obtenues à la configuration 5.

Tableau 3. 7: Performances des différentes configurations

<b>Configuration</b>	<b>Noyau</b>	<b>MSE</b>	<b>RMSE</b>	<b>MAE</b>	<b>R<sup>2</sup></b>
<b>1</b>	Linéaire	0,933	0,966	0,734	0,720
	Rbf	1,009	1,004	0,771	0,697

<b>Configuration</b>	<b>Noyau</b>	<b>MSE</b>	<b>RMSE</b>	<b>MAE</b>	<b>R<sup>2</sup></b>
	Poly. degré 2	0,994	0,997	0,764	0,701
	Poly. degré 3	1,046	1,023	0,789	0,686
<b>2</b>	Linéaire	0,165	0,406	0,323	0,950
	Rbf	0,214	0,462	0,364	0,936
	Poly. degré 2	0,230	0,480	0,374	0,931
	Poly. degré 3	0,299	0,547	0,412	0,910
<b>3</b>	Linéaire	0,165	0,407	0,324	0,950
	Rbf	0,216	0,464	0,357	0,935
	Poly. degré 2	0,246	0,496	0,382	0,926
	Poly. degré 3	0,461	0,679	0,518	0,861
<b>4</b>	Linéaire	0,124	0,377	0,303	0,957
	Rbf	0,169	0,411	0,318	0,949
	Poly. degré 2	0,171	0,414	0,315	0,949
	Poly. degré 3	0,217	0,466	0,327	0,935
<b>5</b>	<b>Linéaire</b>	<b>0,128</b>	<b>0,357</b>	<b>0,295</b>	<b>0,962</b>
	Rbf	0,168	0,410	0,350	0,950
	Poly. degré 2	0,161	0,401	0,327	0,952
	Poly. degré 3	0,201	0,448	0,350	0,940
<b>6</b>	Linéaire	0,902	0,950	0,721	0,729
	Rbf	0,959	0,979	0,743	0,712
	Poly. degré 2	0,976	0,988	0,750	0,707
	Poly. degré 3	1,003	1,002	0,758	0,699
<b>7</b>	Linéaire	0,838	0,915	0,694	0,748
	Rbf	0,894	0,946	0,722	0,731
	Poly. degré 2	0,940	0,713	0,764	0,734
	Poly. degré 3	0,960	0,736	0,789	0,723
<b>8</b>	Linéaire	0,912	0,955	0,726	0,726
	Rbf	0,991	0,995	0,763	0,702
	Poly. degré 2	0,990	0,955	0,768	0,702
	Poly. degré 3	1,104	1,051	0,824	0,668

La compilation des différents modèles examinés est illustrée dans la Figure 3.7.



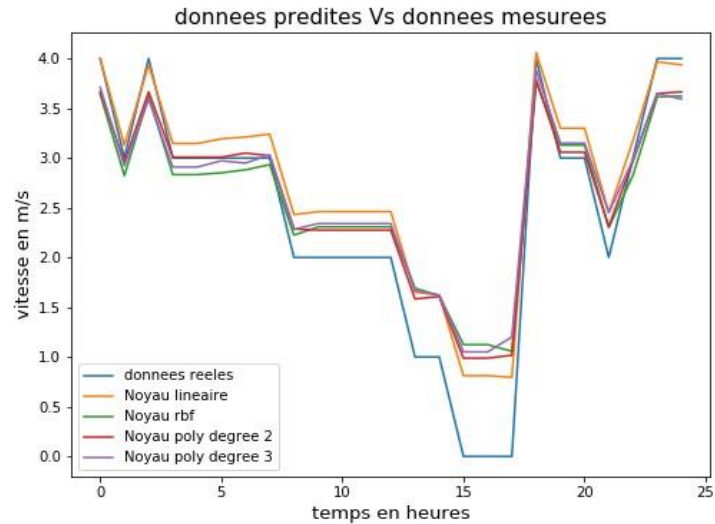


Figure 3. 7: Prédiction de la vitesse du vent: cas du site de Lomé

L'analyse de la Figure 3.7, indique que durant les intervalles de 0-5 heures du matin et entre les périodes de 18-23 heures, on peut enregistrer des vitesses de vent entre 3 et 4 m/s. Par contre elles varient entre 0 et 2,5 m/s pour les intervalles de 06-18 heures, où il y a un fort décrochage du vent.

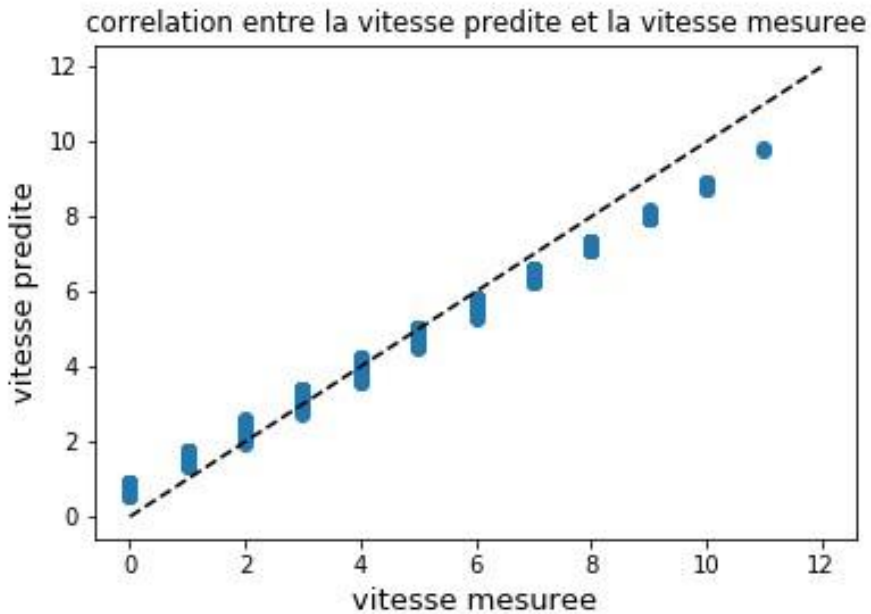


Figure 3. 8 Analyse comparative de la vitesse prédite et mesurée

L'analyse dans la Figure 3.8, montre une très bonne réponse du modèle de prédiction et des données mesurées pour les vitesses du vent entre 2 et 6 m/s. Au-delà de 6m/s, le modèle de prédiction donne des valeurs inférieures. Par contre pour

les vitesses du vent entre 0 et 2 m/s, le modèle produit une réponse supérieure. On peut en déduire que la vitesse du vent sur le site se situe entre 3 et 5,5 m/s.

L'analyse de la Figure 3.8 indique que le modèle produit une réponse satisfaisante entre 2 et 6 m/s, qui s'explique par la présence de vent calme sur le site. De plus, la puissance de densité du vent ne dépasse pas les  $100 \text{ W/m}^2$  [117] ce qui corrobore avec les résultats obtenus dans la Figure 3.9 de la présence de vent calme de classe 1 (voir Annexe 1).

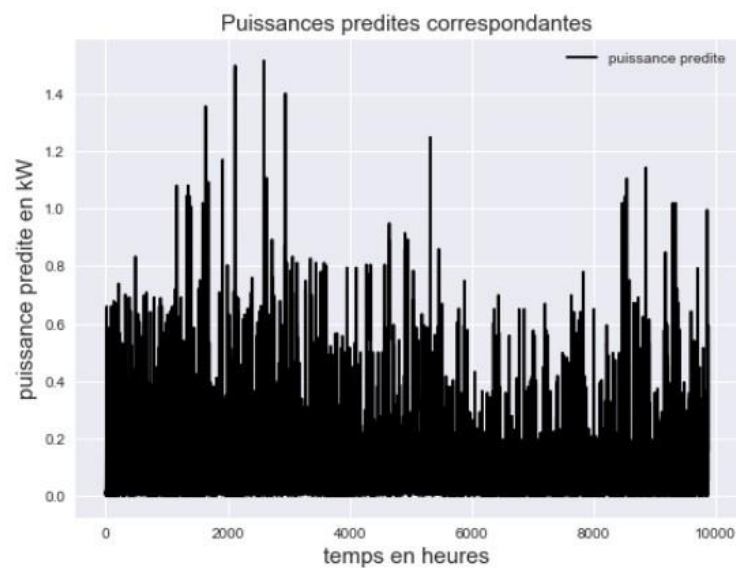


Figure 3. 9: Evaluation de la puissance éolienne récupérable

La puissance éolienne récupérable est indiquée sur la Figure 3.9 en considérant une éolienne du fabricant Indien Auroville Energy Product (puissance nominale = 5 kW, vitesse nominale = 14 m/s, vitesse d'enclenchement = 3,3 m/s). Celle-ci est entre 0,2-0,5 kW sur le site de Lomé. Au regard de cette analyse, il est plus économique d'utiliser l'énergie solaire surtout pour les puissances inférieures à 2-4 kW.

En plus l'utilisation des sources d'énergies hybrides (le vent et le soleil) n'était pas économiquement viable pour les productions pour les puissances inférieures à 10 kWh [63].

### 3.3. Contribution à priori de l'optimalité du nombre de femto/pico-cellules

Cette section présente les résultats des simulations pour trouver le nombre des femto-cellules.

#### 3.3.1. Méthodologies de simulation de l'étude du compromis de l'Efficacité Energétique (EE) et Spectrale (SE)

Pour trouver le nombre optimum de petites cellules par la méthode de Pareto, l'évaluation de l'atténuation est importante. Les paramètres de simulation du réseau hétérogène sont choisis en conformité avec les exigences de la technologie LTE suivant les recommandations spécifiées par le 3GPP TR 36.814 V9.0.0 [101], [123]. L'environnement considéré est de type semi-urbain. Le Tableau 3.8 présente avec les détails sur le calcul de l'affaiblissement du signal à partir du modèle de loi de puissance.

Tableau 3. 8: Paramètres de simulation pour l'évaluation de l'affaiblissement

Type de lien	Modélisation de l'affaiblissement du signal à 2GHz (d en km)
eNB vers UE	$P_{l_{LOS}}(d) = 78,42 + 24,2 \log_{10} \left( \frac{d}{d_0} \right), \text{ cas de la visibilité directe}$ <p>avec <math>d_0 = 0,1 \text{ km}</math></p> $P_{l_{NLOS}}(d) = 78,42 + 35 \log_{10} \left( \frac{d}{d_0} \right), \text{ cas de la non-visibilité directe}$ $Prob(d) = \min \left( \frac{0,018}{d}, 1 \right) * \left( 1 - \exp \left( -\frac{d}{0,063} \right) \right) + \exp \left( -\frac{d}{0,063} \right)$
eNB vers femto	$P_{l_{LOS}}(d) = 78,42 + 20,5 \log_{10} \left( \frac{d}{d_0} \right), \text{ cas de la visibilité directe}$ $P_{l_{NLOS}}(d) = 78,42 + 36,3 \log_{10} \left( \frac{d}{d_0} \right), \text{ cas de la non-visibilité directe}$ $Prob(d) = \min \left( \frac{0,018}{d} \right) * \left( 1 - \exp \left( -\frac{d}{0,072} \right) \right) + \exp \left( -\frac{d}{0,072} \right)$
femto vers eNB	$P_{l_{LOS}}(d) = 78,42 + 20,5 \log_{10} \left( \frac{d}{d_0} \right), \text{ cas de la visibilité directe}$

Type de lien	Modélisation de l'affaiblissement du signal à 2GHz (d en km)
	$P_{l_{NLOS}}(d) = 78,42 + 36,3 \log_{10} \left( \frac{d}{d_0} \right)$ , cas de la non-visibilité directe $Prob(d) = \min \left( \frac{0,018}{d} \right) * \left( 1 - \exp \left( -\frac{d}{0,072} \right) \right) + \exp \left( -\frac{d}{0,072} \right)$
UE vers eNB	$P_{l_{LOS}}(d) = 78,42 + 20,9 \log_{10} \left( \frac{d}{d_0} \right)$ , cas de la visibilité directe $P_{l_{NLOS}}(d) = 78,42 + 37,5 \log_{10} \left( \frac{d}{d_0} \right)$ , cas de la non visibilité directe $Prob(d) = 0,5 - \min(0,5 \exp(-0,156/d)) + \min \left( 0,5 \exp \left( -\frac{d}{0,03} \right) \right)$

Légende : cas de la visibilité directe (LOS), et la non visibilité directe (NLOS).

Le Tableau 3.9 présente les paramètres de simulation du canal de propagation et les caractéristiques de consommation des nœuds.

Tableau 3. 9: Paramètres de l'environnement de simulation

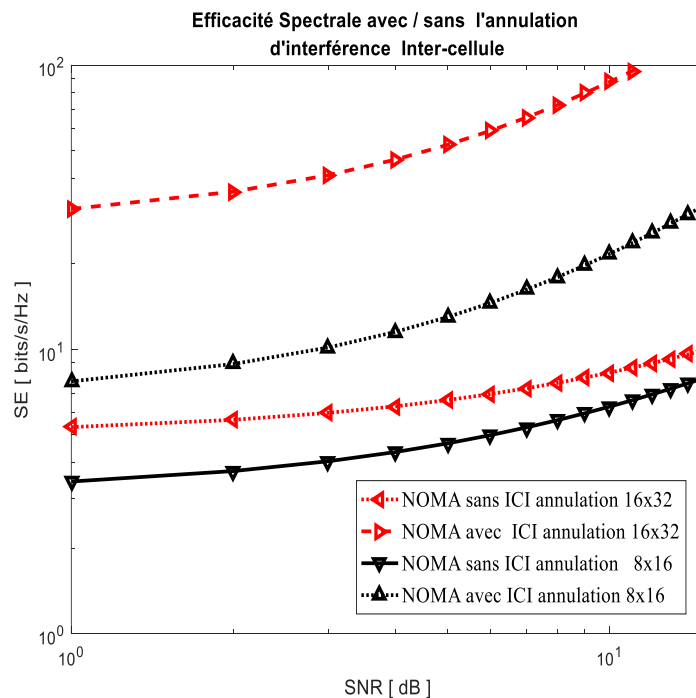
Désignation	Symbol	LTE
Nombre d'utilisateurs	N	50
Constance de distribution des cellules	a	0,6
Densité des terminaux mobiles	$\mu = u$	0,95
Densité des nœuds BS	$\lambda_b = b$	0,33
Densité des nœuds BS-User	d=b/u	
Variance du canal Gaussien	D	25
Evanouissement à court terme	h	-10
Densité spectrale de puissance	$N_0$	-174 dBm/Hz
Largeur de bande	B	10 MHz
Bloc temps-fréquence	RB	1ms/180 Khz
Fréquence d'operating	f	2 GHz
Macro-cellule (CBS)	$P_{Amp}$	300 W
	$\eta$	6,67%
	$P_{Tx}$	20-40 W 43-46 dBm
La puissance du circuit de transmission	$P_c$ [W]	100

Désignation	Symbol <i>e</i>	LTE
La puissance du circuit de la non transmission	$P_0$ [W]	
Circuit du traitement	$P_{dsp}$	100
Circuit de génération du signal de base	$P_{gen}$	384
AC-DC convertisseur	$P_{conv}$	100
Support équipement	$P_{link}$	80
La climatisation et éclairage	$P_{cool}$	690
Puissance de Transmission du relai d'extension ici petite cellule	Pra	1 W 30 dBm
Puissance de Transmission des petites cellules	Ps	0,11 W 23 dBm
Densité des petites cellules	$\lambda_f$	$[0; 5] \times 10^{-6}$

### 3.3.2. Compromis entre l'efficacité énergétique (EE) et spectrale (SE)

Dans cette section, le compromis entre l'efficacité énergétique (EE) et spectrale (SE) est étudié avec une configuration MIMO des antennes à la station macrocellule.

Figure 3. 10: Efficacité spectrale avec NOMA



L'analyse de l'architecture MIMO des antennes utilisées à la macrocellule est présentée avec une technique d'accès multiple non-orthogonale (NOMA). Dans une configuration hétérogène, les utilisateurs n'accèdent pas aux ressources du réseau à partir de la cellule la plus proche. Cela explique le choix de l'utilisation de la technique NOMA. Dans la Figure 3.10, l'efficacité spectrale avec NOMA est évaluée avec la méthode de réduction successive d'interférences inter-cellules. Il est à noter que l'analyse montre que l'utilisation de la technique d'annulation des interférences améliore considérablement l'efficacité spectrale. Cette solution sera utilisée dans l'étude du compromis de l'efficacité énergétique et spectrale à une macrocellule.

Les résultats dans les Figures 3.11-3.13, sont obtenus à partir des paramètres de simulation des Tableaux 3.8 et 3.9. Dans cette simulation, la technologie LTE a été considérée ; et le modèle de l'affaiblissement d'un canal gaussien est supposé. La puissance de rayonnement de la macrocellule est fixe.

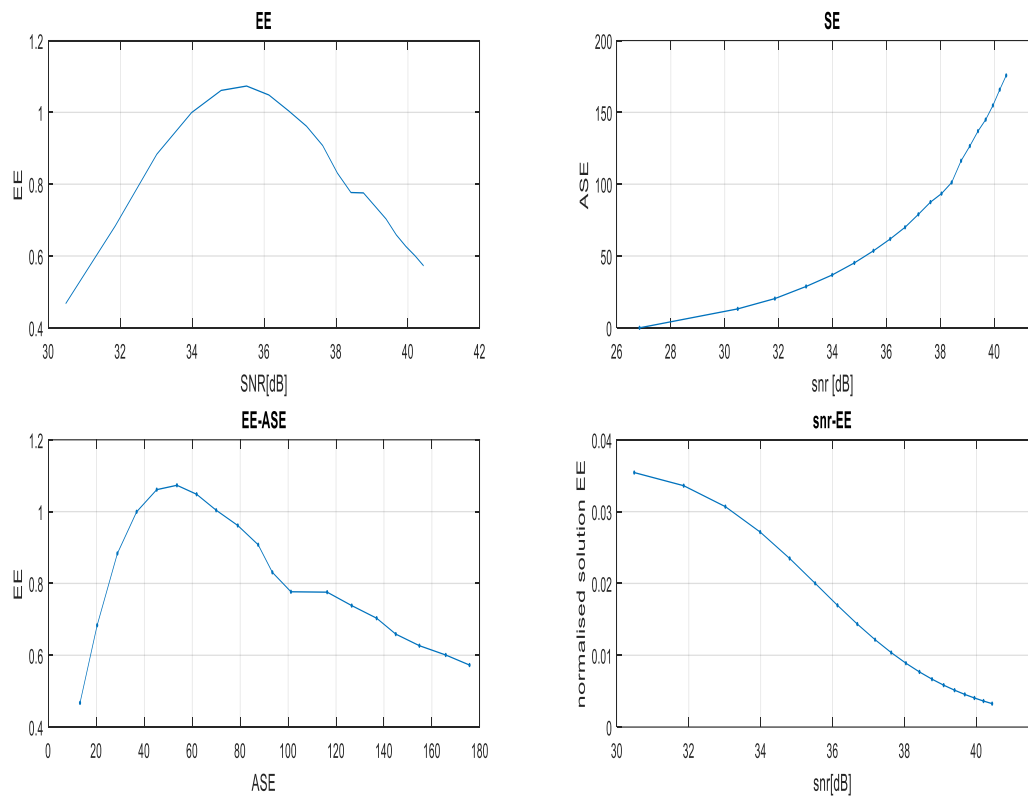


Figure 3. 11: Analyse montrant le snr vs EE; snr vs ASE; ASE vs EE (1<sup>er</sup>)

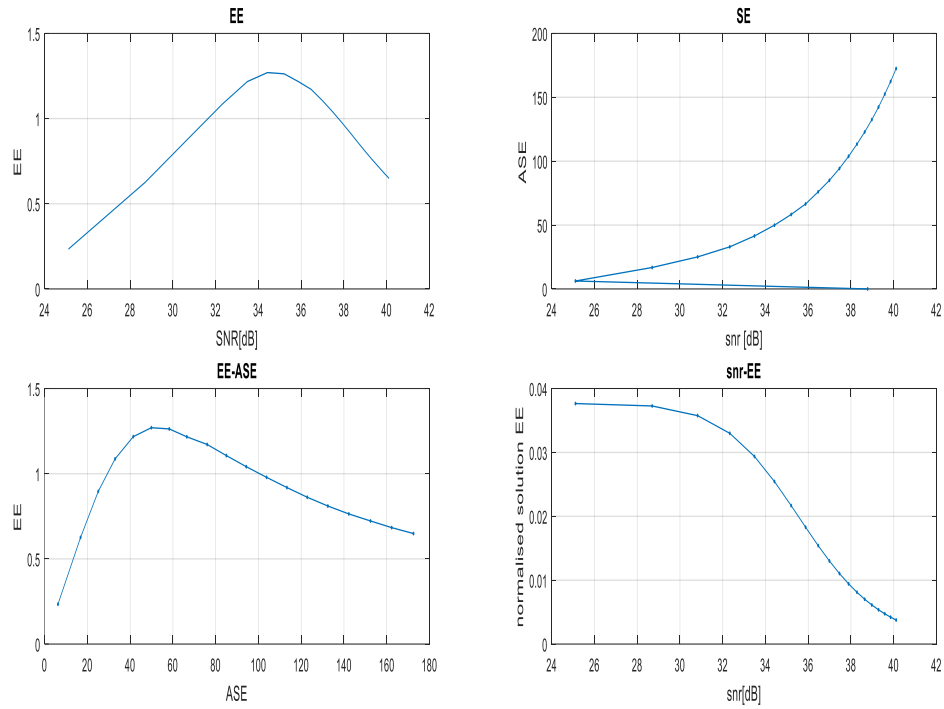


Figure 3. 12 : Analyse montrant le snr vs EE; snr vs ASE; ASE vs EE (2<sup>ème</sup>)

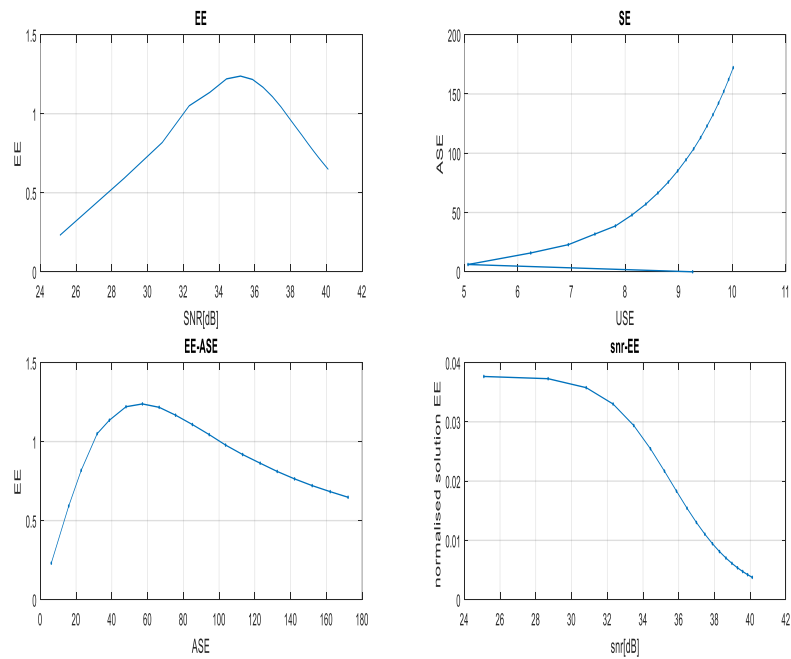


Figure 3. 13: Analyse comparative de snr vs EE; snr vs SE; SE vs EE (3<sup>ème</sup>)

Les simulations dans les Figure 3.11-13 prennent en compte une macrocellule et les terminaux mobiles. L'efficacité énergétique (EE), l'efficacité spectrale (SE),

l'efficacité spectrale par unité de surface (ASE) et le rapport signal bruit (snr) pour un canal gaussien sont présentés à partir des courbes suivantes le snr vs EE; snr vs ASE; ASE vs EE dans les sous graphes. Le point maxima est le point correspondant au point optimal de Pareto.

L'analyse des Figures 3.11-3.13 montre que le point optimal de Pareto est constant quel qu'en soit le nombre d'utilisateurs et la transmission de puissance par le contrôle de puissance opportuniste des usagers.

D'une part, l'accroissement peut être approché par une fonction linéaire. Lorsque le point maximum n'est pas atteint. Lorsque celui-ci est atteint, il s'en suit une dégradation dans la qualité mais qui n'est pas remarquable car l'efficacité énergétique (EE) approche une limite asymptotique quand le nombre d'utilisateurs est sans cesse galopant.

En plus, il faut ajouter que la décroissance des courbes de l'efficacité énergétique (EE) contre le signal sur bruit est essentiellement dû à l'augmentation des usagers mobiles, la même observation peut être faite dans le cas où les petites cellules sont utilisées bien que ces dernières sont généralement en ligne de visée avec la macrocellule.

D'autre part, lorsque l'on se rapporte à la qualité de services définie par le consortium du projet de partenariat de la troisième génération (3GPP) [123] qui identifie 4 types de services de communication tels que le service vocal avec un débit de 4~64 kbps ayant un délai de 100 ms ; vidéo en diffusion (streaming) dont le débit est 50~85 kbps, pour un délai de 150 ms ; vidéo en interaction qui a un débit de 3~385 kbps avec un temps de latence de 250 ms ; et le bruit du canal 15~10<sup>5</sup> kbps. Les faibles valeurs du signal sur interférence bruit sont l'équivoque d'un petit nombre de femtocellules où l'accroissement de l'efficacité énergétique (EE) est linéaire, cependant lorsque ce nombre approche une certaine valeur, il génère un point maximum (techniquement le goulot d'étranglement) mais un compromis doit être fait.



En somme, lorsque le nombre d'utilisateurs est négligeable, l'efficacité énergétique approche une valeur zéro qui explique que le système requiert une puissance négligeable pour maintenir les équipements en mode endormissement.

### 3.3.3. Etude de la puissance de rayonnement et de la puissance statique

Dans cette étude la marge de l'interférence inter-macrocellule était fixée à 3 dB.

L'analyse rapportée à la Figure 3.15 indique que le fait d'augmenter la puissance de rayonnement de la macro-cellule BS ne peut pas nécessairement améliorer l'efficacité spectrale de la cellule par rapport au nombre de cellules de petite taille.

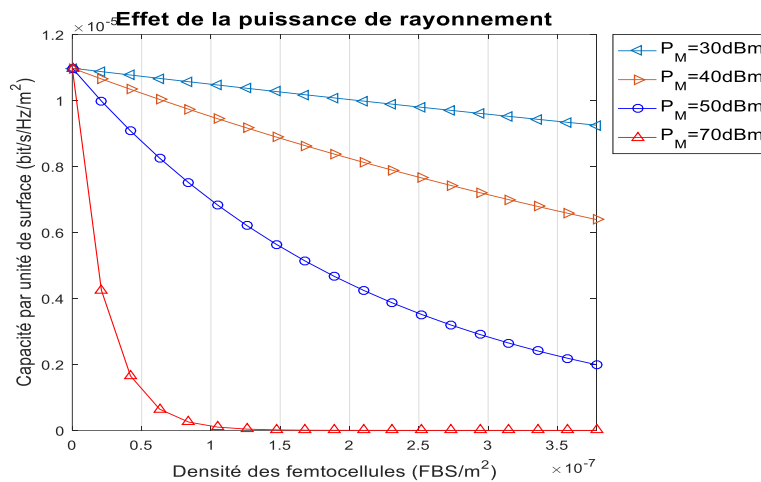


Figure 3. 14: Effet de la puissance émise et le nombre de petite cellule

Lorsque la puissance de rayonnement est élevée, une faible densité des femto cellules est nécessaire pour atteindre le point optimal mais l'effet de l'interférence est très élevé. En effet à la Figure 3.14, lorsque l'on maximise l'efficacité spectrale, la densité optimale de petites cellules est nulle et vice-versa qui n'est pas une solution faisable ; et inversement vice-versa pour une densité élevée des femtocellules. Le point minima est le point correspondant au point optimal de Pareto. On peut conclure qu'une puissance de rayonnement élevée est nécessaire au déploiement pour avoir une faible densité de femtocellules sauf que cela expose les

autres cellules à une forte interférence. Malheureusement, le choix de la puissance de rayonnement reste le défi des systèmes de communications cellulaires futures, et a de même une impacte sur l'environnement écologique.

Lorsque la puissance de rayonnement est basse, la maximisation résulte d'une fonction de proportionnalité linéaire entre l'efficacité spectrale et la densité des femto cellules.

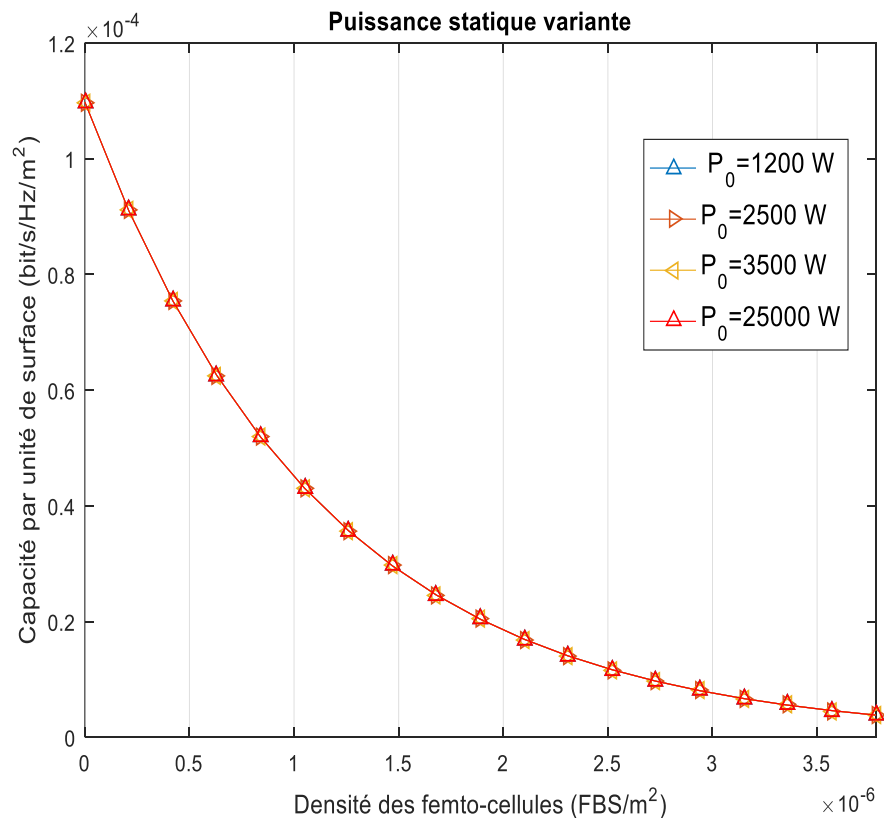


Figure 3.15 : Puissance statique variante sans introduction des ER

L'analyse de Figure 3.15 illustre l'effet de la puissance statique lorsque le système est alimenté par une source constante autre que celle d'origine renouvelable. Il en ressort que l'effet de l'interférence est constant. Cela signifie qu'en augmentant la puissance statique des sites de communication cela entraîne peu d'interférence. En effet, en variant la puissance statique dans un environnement comme dépité dans la Figure 3.15, les résultats obtenus ne permettent pas d'avoir une idée située sur le nombre optimal de cellules à faible puissance. Le point optimal est donné par les fronts de Pareto, et qui peut être déterminé par une méthode graphique [22]. La

maximisation du débit de l'ordre  $0,4 \text{ bit/s/Hz/m}^2$  est faisable lorsque la densité des femtocellules est à près de  $1 \times 10^{-6}/\text{m}^2$ .

### 3.3.4. Effet de l'utilisation de l'énergie éolienne et solaire

L'illustration de l'effet de l'intégration des sources d'énergies sur le nombre optimal de petites cellules est faite sur les Figures 3.16 à 3.17.

L'analyse de la Figure 3.16, montre qu'à une vitesse de vent constante, le fait de varier l'irradiation solaire résulte d'une interférence constante lorsque la densité des femtocellules augmente. Le point optimal de Pareto correspondant à la maximisation de l'efficacité spectrale peut être déterminé par la méthode graphique de projection sur les axes.

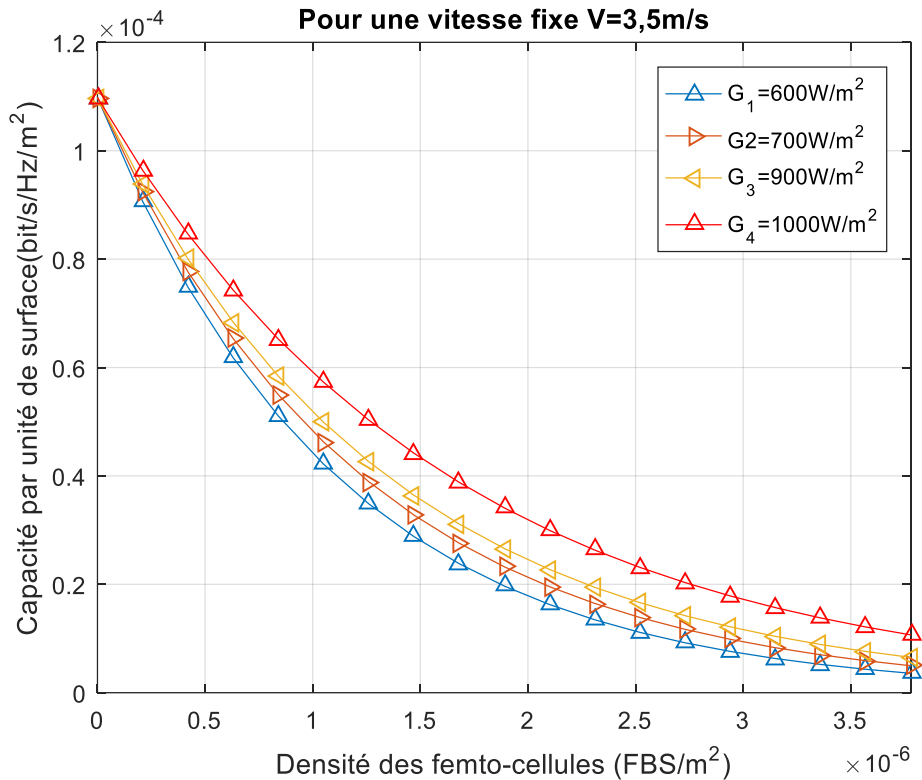


Figure 3. 16: Effet de la puissance statique à une irradiation variante

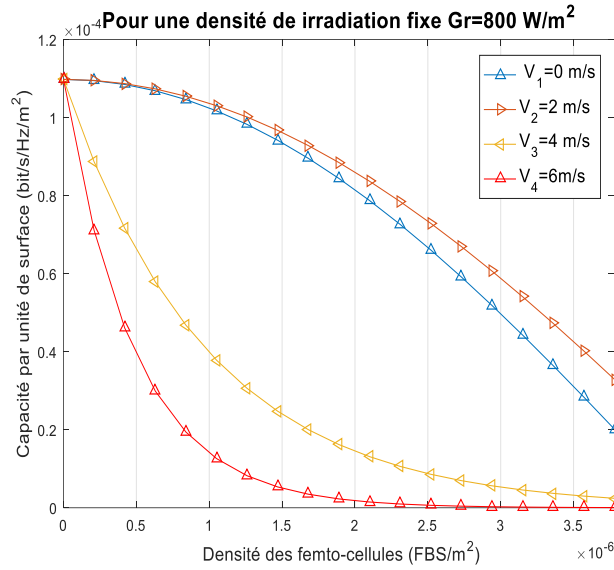


Figure 3. 17: Effet de la puissance statique à une vitesse du vent variable

Cependant la Figure 3.17 montre que lorsque la vitesse du vent est inférieure à 2 m/s, l'efficacité spectrale est une fonction monotone concave de la densité des petites cellules. Dans ce cas-ci, il est très complexe de trouver la valeur optimale compromise de la densité des femtocellules devant permettre à atteindre la maximisation du débit. Un autre regard sur les résultats de la Figure 3.17, relève que pour une valeur de la vitesse du vent supérieure à 2 m/s l'efficacité spectrale est une fonction convexe de la densité des femtocellules.

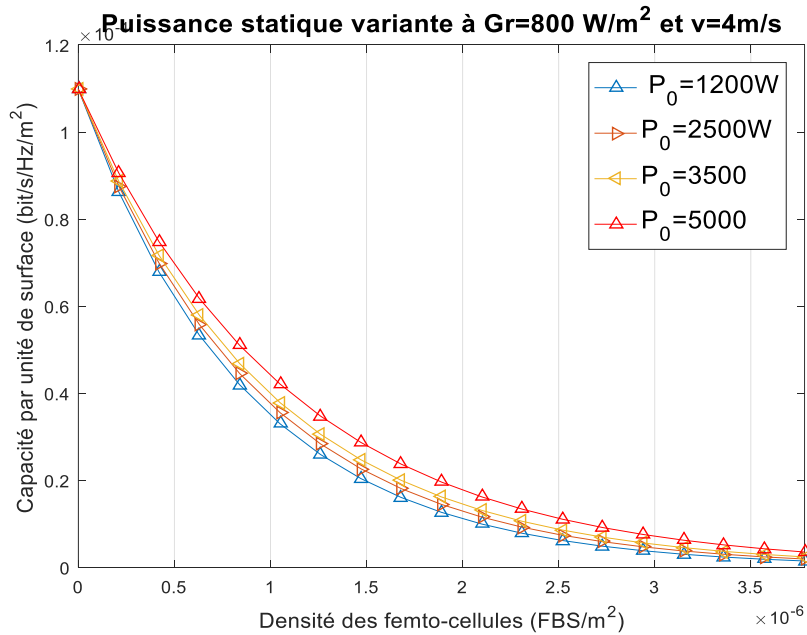


Figure 3. 18 : Puissance statique et effet de l'intégration des ER

Lorsque la densité des femtocellules augmente, l'interférence aussi augmente. Cette dernière observation est faite dans la Figure 3.18 où la convexité de la fonction de l'efficacité spectrale est encore établie.

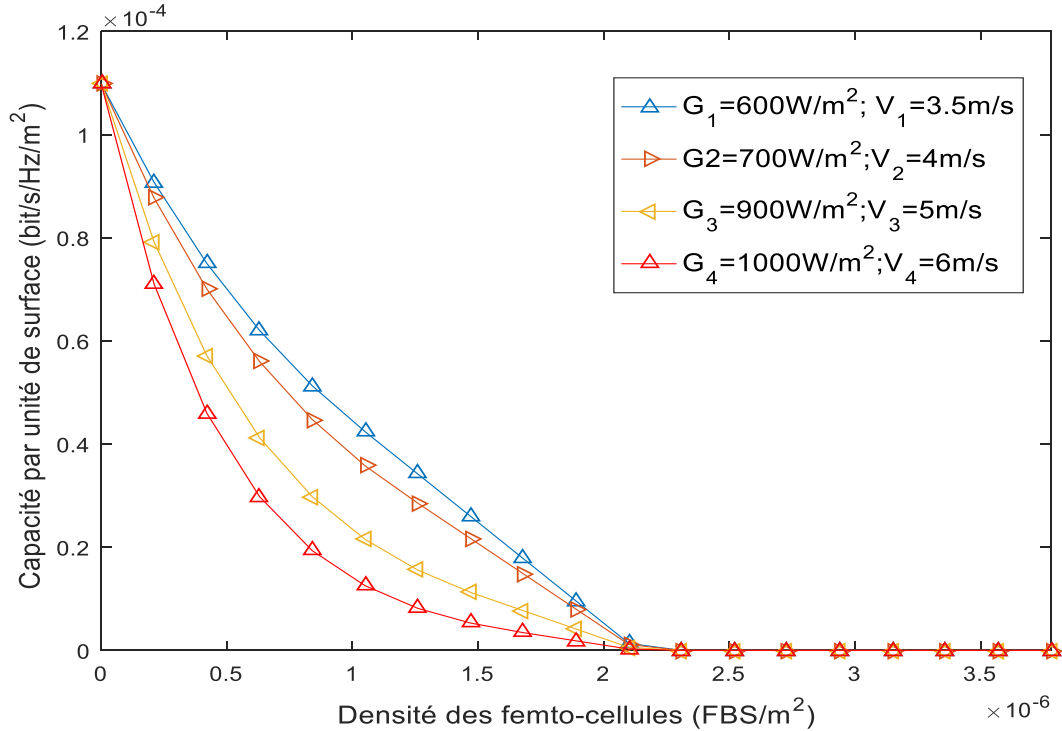


Figure 3. 19 Effet de la puissance statique fixe à une irradiation et une vitesse du vent variable (de l'ER)

Dans la Figure 3.19 l'effet de l'interférence entre les macrocellules est fixé à 0 dB. Dans ce cas, la maximisation de l'efficacité spectrale est une fonction monotone convexe et décroissante. Elle peut être approchée par une fonction linéaire pour des valeurs de la densité des femtocellules dans l'intervalle  $\lambda_f \in ]0; 2[ \times 10^{-6}$ .

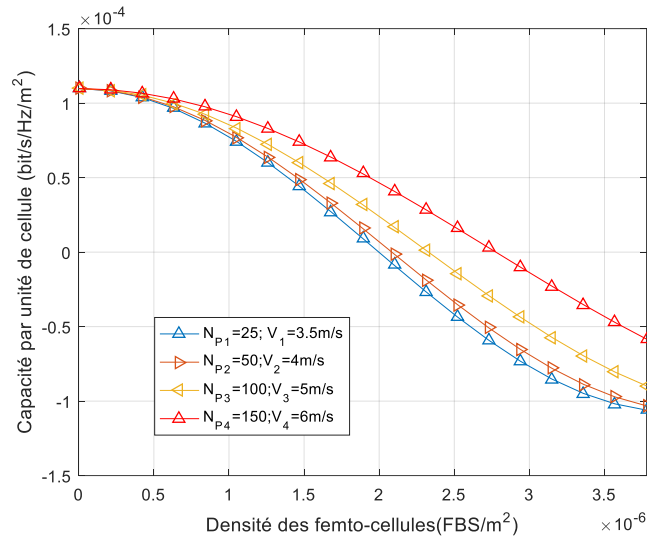


Figure 3. 20: Considération des modules solaires

Dans l'étude de la Figure 3.20, l'interférence inter-macrocellule est maintenue à 0 dB. L'effet de l'injection des énergies renouvelables est analysé avec un intérêt sur le nombre de panneaux de solaire photovoltaïque. Lorsque le nombre de densité des femtocellules augmente, l'efficacité spectrale par unité de surface peut avoisiner des valeurs négatives. Cela peut être expliqué par l'effet de la respiration de la cellule, qui est un phénomène où la cellule se dilate sous la présence d'interférence importante. Ce résultat est analogue aux résultats précédents dans la Figure 3.21.

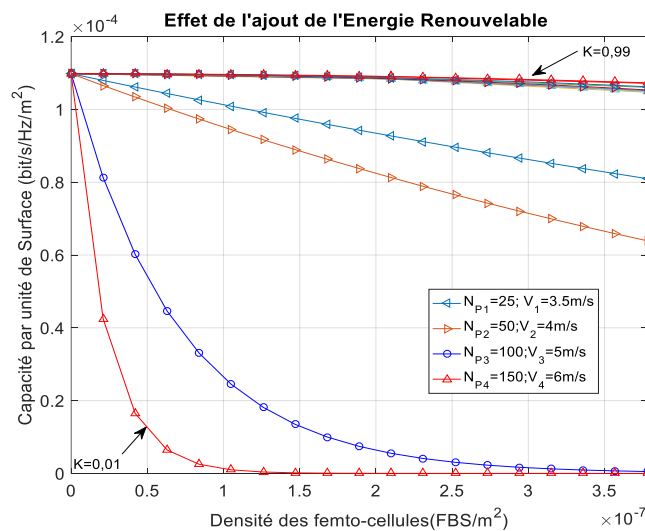


Figure 3. 21: Effet de la proportion des ERs

Dans la Figure 3.21, la maximisation du débit de l'ordre 0,6 bit/s/Hz/m<sup>2</sup> et 0,5 bit/s/Hz/m<sup>2</sup> est faisable avec une densité des femtocellules qui est de l'ordre de 0,9 et 1,5x10<sup>-6</sup> m<sup>-2</sup> respectivement pour une vitesse du vent de 6 m/s et 3,5 m/s.

### 3.3.5. Effet de la puissance de transmission par rapport à la densité des terminaux mobiles

L'efficacité spectrale de la femtocellule est étudiée par rapport à l'optimisation de la puissance de transmission du terminal et à la densité des terminaux mobiles en appliquant la technique d'accès multiple non orthogonale. Cette analyse est illustrée dans la Figure 3.22.

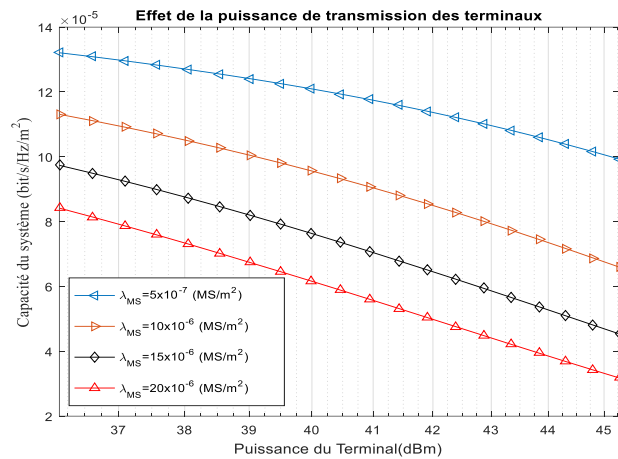


Figure 3. 22: Effet de la puissance de transmission

L'analyse de la Figure 3.22, montre que la maximisation de l'efficacité spectrale et la puissance de transmission du mobile peut être rapprochée par une fonction linéaire si la densité des terminaux mobiles est forte mais le système est limité par les interférences particulièrement sur la liaison descendante (voir Figure 3.23).

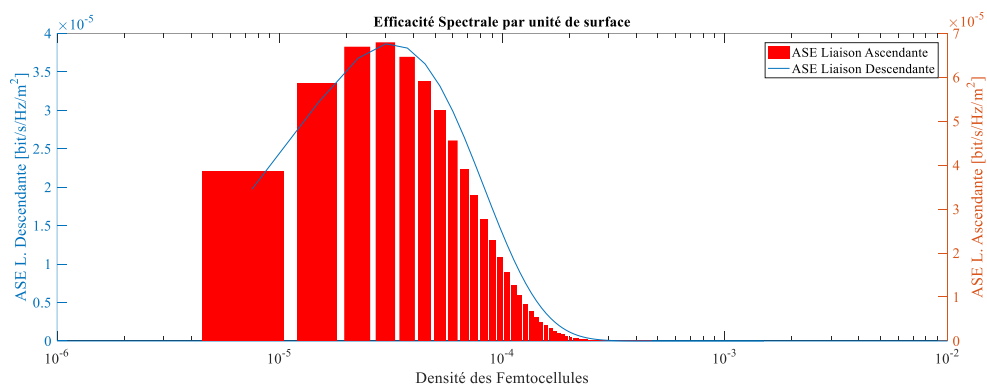


Figure 3. 23 : Efficacité spectrale sur les liaisons ascendante et descendante

L'histogramme de la Figure 3.23 indique combien de fois la liaison descendante est la plus sollicitée que celle de liaison ascendante. La valeur optimale de la densité des femtocellules est obtenue à près de  $5 \times 10^{-5}$  par mètre carré.

### 3.4. Optimisation a priori de la consommation due au modèle de propagation par la méthode de régression

Dans cette partie, le calcul de l'affaiblissement du signal est considéré par une méthode mixte des modèles de Friis et de COST-231.

#### 3.4.1. Méthodologie de collecte de données pour l'optimisation du modèle de propagation

Les données des mesures pour l'optimisation de la consommation énergétique due aux modèles de propagation sont obtenues par la méthode du drive test (Figure 3.24 A et B).



A : schématique du système

Figure 3. 24 : Les matériels du drive test en place

La procédure de mesure reposait sur l'utilisation d'un système de transmission continue d'un faisceau hertzien comme dépitée dans la Figure 3.24 (B). Avant de procéder à l'évaluation du test, les BTS ou BS du sous-système doivent être préalablement identifiées, puis l'itinéraire à suivre doit être tracé. Les outils de mesure du système sont: une antenne réceptrice de géo-référentiel, deux combinés GSM, un logiciel de contrôle de drive test (TEMS Investigation version 21), un ordinateur portable, un logiciel d'informations cartographiques (Map Info version 17), un onduleur, une carte d'extension et le logiciel GPS 76 version 2. Le mode d'appel continu a été utilisé pour le test de la collecte. En plus, il faut noter que dans notre étude le M2 est assigné au bureau (centre).



### 3.4.2. Calibration par la méthode de régression à une pente et deux pentes

Cette section présente la méthode de régression multiple à deux pentes et quelques méthodes de régression.

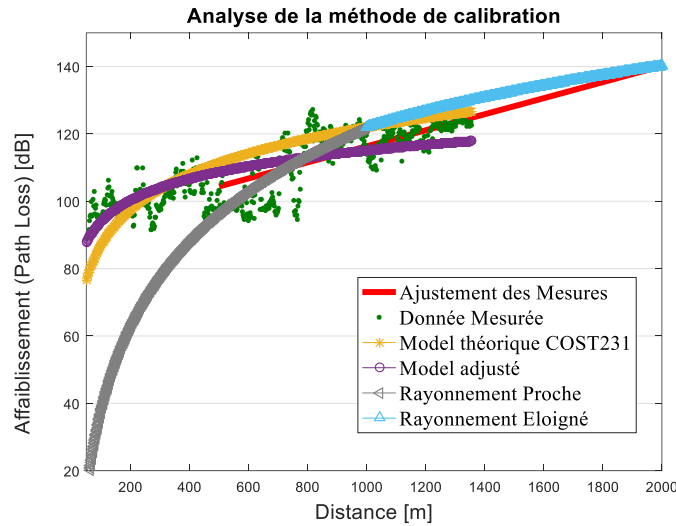


Figure 3.25 : Calibration avec une pente et deux pentes

L'analyse de la Figure 3.25 présente quatre méthodes théoriques, le modèle de COST231, le modèle ajusté par la régression simple appliquée à l'ensemble de l'échantillon des données de mesures, puis une calibration appliquée suivant deux décompositions une applicable dans le rayonnement proche et l'autre dans le rayonnement éloigné de l'antenne. Ces méthodes sont comparées avec les données mesurées. Les résultats indiquent que la méthode par décomposition dans le champ éloigné présente une bonne calibration par rapport aux autres méthodes particulièrement dans le rayonnement éloigné où il est important de mitiger les interférences des cellules adjacentes. La calibration du modèle des pertes contribue à réduire l'effet de l'interférence. La performance du modèle COST231 n'est pas satisfaisante compte tenu de l'environnement structurel et des conditions climatiques.

### 3.4.3. Cas pratique de l'optimisation du modèle de propagation par la méthode de régression simple

Le Tableau 3.10 présente une calibration du modèle COST-231 et de Stanford University Interim (SUI, voir Annexe D) par une méthode d'optimisation de régression linéaire avec une pente dans les villes du Togo.

Tableau 3. 10: Comparaison entre le modèle COST-231 et le modèle SUI

Sites d'études	Modèle de Stanford University Interim (SUI)						Modèle COST 231-Hata			
	Urbaine		Semi-urbaine		Rurale		Urbaine		Semi urbaine	
	ME	MSE	ME	MSE	ME	MSE	ME	MSE	ME	MS E
Adanka	15,42	17,31	8,53	10,07	5,24	6,73	10,30	10,43	8,78	8,93
Adéticopé	8,34	10,32	2,11	4,75	0,57	3,18	5,89	5,91	4,37	4,40
Agbodrafo	1,21	6,45	5,51	7,12	8,50	9,14	2,74	2,85	4,26	4,33
Agbonou	6,36	13,29	0,87	9,89	1,35	8,83	6,16	8,71	4,64	7,71
Akparé	13,29	15,58	6,00	8,71	2,67	5,83	7,62	8,05	6,10	6,63
Alinka	1,34	4,85	6,74	7,31	8,91	9,07	1,27	1,52	2,79	2,91
Amaoudè	1,12	7,03	5,64	7,61	8,64	9,52	2,92	3,24	4,44	4,66
Amédenta	0,50	5,53	5,81	6,89	8,55	8,93	2,22	2,22	3,74	3,74
Amouoblo	11,61	13,48	4,58	6,80	1,41	4,14	6,73	6,86	5,21	5,37
Aouda	11,83	13,62	4,51	6,67	1,15	3,96	6,06	6,18	4,54	4,69
Assiyéyé	9,59	11,7	14,7	15,47	16,7	17,1	8,61	8,69	10,13	10,2
Atchangbadè	4,42	8,54	2,44	6,00	5,51	7,02	0,06	1,77	1,46	2,30
Bohou	3,70	7,32	9,38	10,40	11,72	12,2	4,49	4,56	6,01	6,06
Davié	6,08	9,82	0,87	5,96	3,99	6,22	1,45	2,63	0,07	2,19
Hihéatro	3,22	8,72	2,65	6,82	5,10	7,26	1,87	3,19	0,34	2,62
Kara-dongoyo	1,06	11,61	5,35	11,11	8,14	11,86	1,95	6,35	3,47	6,97
Kara-marché	5,13	9,96	11,25	13,11	13,87	14,96	7,27	7,88	8,79	9,30
Kélégougan	3,57	6,77	3,26	5,11	6,31	6,91	0,69	0,74	2,22	2,23
Kolondè	5,15	10,13	1,64	7,09	4,67	7,43	1,00	3,36	0,52	3,25
Kpatégan	13,57	17,06	6,21	10,45	2,83	7,92	7,69	9,06	6,16	7,82
Lamatessi	14,12	17,12	6,61	10,26	3,13	7,42	7,76	8,80	6,24	7,49
Lomé-centre	13,52	14,62	18,63	19,01	20,63	20,8	12,6	12,6	14,12	14,1
Nukafu	4,92	7,85	11,04	11,85	13,66	14,02	7,05	7,08	8,57	8,59
Passoua	1,46	10,04	5,95	10,05	9,36	11,67	4,58	6,34	6,10	7,51
Pyra	5,78	11,62	1,14	8,34	4,24	8,30	1,23	4,72	0,29	4,56

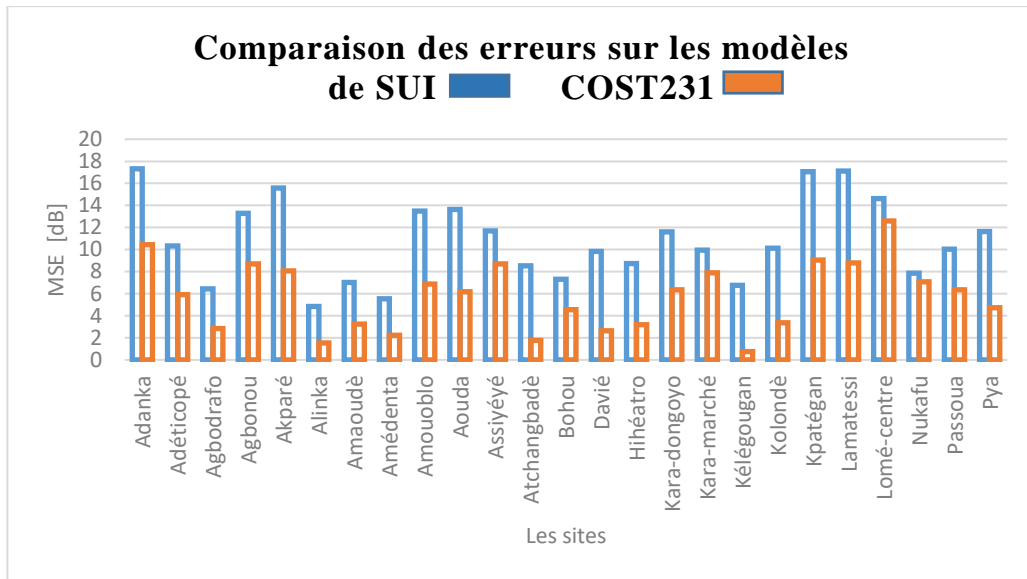


Figure 3. 26 : Comparaison de l’erreur sur les modèles SUI et COST231

Dans la Figure 3.26, l’étude comparative entre le modèle SUI et de COST231 montre que le COST231 génère moins d’erreurs que celui de SUI dans l’environnement d’étude. Par conséquent les deux modèles nécessitent les paramètres de calibrations avant d’être utilisés dans notre environnement. Cela résultera d’une bonne maîtrise de la puissance de rayonnement et la réduction de l’interférence surtout pour les usagers à la fin d’une cellule.

#### 3.4.4. L’optimisation a priori de la puissance reçue par les réseaux de neurones artificiels

La puissance de transmission de la station de base était fixe lors du drive-test. L’équation (2.9) a été adaptée à un système de réseau de neurone artificiel (RNA) de type perceptron multicouche (MLP) pour la calibration du modèle théorique dont les résultats sont consignés dans le Tableau 3.11. Le modèle 10 a été retenu comme le mieux performant. C’est ainsi que ce modèle a été utilisé pour la calibration du modèle théorique contre les données mesurées comme illustré dans la Figure 3.27. Il faut noter qu’un modèle de propagation radioélectrique est performant lorsque le  $RMSE \leq 8\text{dB}$  et le  $R^2$  est proche de 1. Généralement, lorsque la méthode de régression linéaire est utilisée le RMSE est satisfaisant par contre le  $R^2$  l’est moins.

Au regard de cela, la méthode adoptée dans cette calibration a consisté à utiliser l'algorithme des moindres carrées et à le faire adapter par un système de réseau de neurones artificiels. Cette approche est différente de l'existant en littérature [38], [68].

Tableau 3. 11 : Evaluation du modèle de calibration RNA-MLP

Modèle	Nombre de neurones cachés	RMSE	R <sup>2</sup>
1	1	13,56196	0,88444
2	2	15,55595	0,862946
3	3	11,30514	0,892164
4	4	15,55595	0,900092
5	5	13,42996	0,904272
6	6	14,56376	0,911031
7	7	16,29176	0,885004
8	8	8,627985	0,922976
9	9	7,76802	0,903466
<b>10</b>	<b>10</b>	<b>7,6331</b>	<b>0,928841</b>
11	11	9,65781	0,934299
12	12	10,88625	0,93311
13	13	13,46717	0,896878
14	14	12,91497	0,899648
15	15	15,5177	0,897774
16	16	7,21032	0,90241
17	17	7,47767	0,919495
18	18	12,71431	0,908785
19	19	13,55259	0,897175
20	20	7,74052	0,882354
21	21	17,43351	0,894834
22	22	16,03718	0,895690
23	23	13,50402	0,909383
24	24	13,30673	0,912278
25	25	24,3249	0,849057
26	26	17,80246	0,897231
27	27	11,79116	0,923664
28	28	18,36683	0,84090
29	29	13,23782	0,87897

Tableau 3. 12 Résultats comparatifs de la méthode proposée

Statistiques	RNA	Méthode de régression
R <sup>2</sup>	0,928841	0,4114
RMSE	7,6331	6,592

Les résultats de cette méthode sont donnés dans la Figure 3.27.

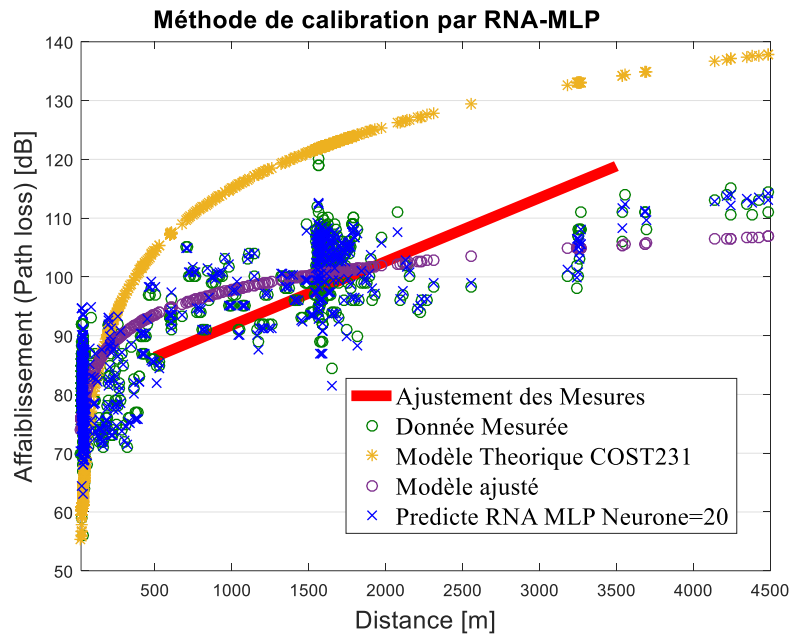


Figure 3. 27 : Analyse comparative des méthodes de régression avec le RNA

Dans la Figure 3.27, trois méthodes théoriques, le modèle de COST231, le modèle ajusté par la méthode de régression simple, et la méthode des réseaux de neurone artificiels à couche multiple à perceptron (RNA-MLP) sont comparées avec les données mesurées. Les résultats obtenus par la méthode de régression indiquent que le modèle ajusté pour le cas du Togo présente une bonne performance par rapport au modèle empirique (théorique) COST-231 et par suite contre les données mesurées. Certes l'écart de déviation peut être expliquée par les paramètres liés aux conditions de l'environnement. L'analyse de la Figure 3.27 indique la performance du modèle RNA-MLP est meilleure par rapport à la méthode de régression linéaire. Il est à noter que la calibration par la méthode des réseaux de neurones (RNA) donne de très meilleurs résultats. En effet, il y a une concordance parfaite avec la méthode du RNA et celle des données mesurées. La méthode du RNA est par conséquent meilleure. On remarque de plus que dans le Tableau 3.12 la valeur du RMSE obtenue par RNA est inférieure à 8 dB que celle obtenue par la méthode de régression. Alors que la RNA donne une valeur  $R^2$  proche de 1. Au regard de cette analyse, la méthode de RNA peut être utilisée pour quantifier la marge d'erreur pour la compensation de l'effet de masque dû à l'environnement.

### 3.5. Contribution à l'atout de l'intégration des énergies renouvelables cas au Togo

Cette section évalue la nécessité de l'intégration des énergies renouvelables pour le renforcement de la pénétration de l'électricité et la réduction de l'écart numérique du monde urbain et rural.

#### 3.5.1. L'indice universel d'accès au développement social

Cette section adresse la méthode des choix des sites devant être considérés pour un service à accès universel.

Les statistiques sur quelques équipements des télécommunications sont extraits du rapport fourni par l'autorité de régulation des télécommunications et postes (ARTP) [9], et le niveau de l'électricité sur le rapport sectoriel d'énergie au Togo [11] exercice 2016, il faut noter que la puissance en énergie solaire installée est de l'ordre 301,92 kWc en 2015. Les statistiques du Tableau 3.13 [9], présentent le nombre disponible d'éléments radios au Togo pour les opérateurs de communications mobiles 2G et 3G.

Tableau 3. 13: Nombre de nœuds de communication cellulaire

	Togocel	Moov Atlantique	Total
MSC	5	1	6
BSC	20	3	23
BTS	683	495	1178
Sites GSM	516	350	866
Total	1224	849	2073

Si l'on suppose qu'il n'y a pas de partage de sites entre les opérateurs, lorsqu'un seul site est alimenté par une énergie solaire photovoltaïque, une puissance de 3,96 kWh/jr est produite à une puissance nominale de 94,5 kWc. Alors, on injecterait une augmentation de 100% pour 320 sites, 312% pour 1000 sites par rapport au taux d'énergie solaire dans le système de distribution électrique, cela est sans doute un apport majeur.

On peut se rapporter à l'indice global d'accès universel (UIA) selon l'UIT [13], [70], [71] ; d'un pays, ou d'une zone qui indique le niveau acquis des objectifs de l'accès et du service universel, des deux services principaux que sont le service voix  $T_{UAI_{V_l}}$  et le service de données  $T_{UAI_{D_l}}$ . L'UIT fixe le seuil de  $T_{UAI_{V_l}} = T_{UAI_{D_l}} \leq 0,5$ . Ainsi, l'UAI global varie entre 0 et 1 qui prend en compte le nombre d'abonnés individuels (subscription per person rate, *spp*) ; le nombre de communautés disposant d'un centre de communication électronique publique (subscription per community rate, *spc*) ; le nombre de communautés disposant d'un système d'alerte publique (density of alert facility rate, *spa*) [13].

En l'absence des données détaillées, une redéfinition de l'indice universel d'accès au développement social (*IAD*) pour une communauté ou une zone est considérée par rapport à l'accès national d'un service particulièrement le taux d'accès à l'électricité. Le taux d'électrification est évalué pour une taille moyenne de ménages variant par région selon le recensement national [27]. Les zones sont prises dans la politique du service accès universel par rapport à l'indice d'accès au développement social (*IAD*) lorsque

$$IAD_{Elect_x} = \frac{\text{accès à l'électricité d'une région}}{\text{accès national à l'électricité}} < 1$$

Dans le Tableau 3.14, ce critère est utilisé pour l'évaluation de la pénétration du service à accès universel à l'électricité et aux données dans un contexte d'établissement de l'indice d'accès au développement (*IAD*) des TIC en milieux désenclavés.

Tableau 3. 14 : Application du critère de l'*IAD* par région

Région	Superficie km <sup>2</sup>	Accès à l'électricité	$IAD_{El_x}$
Savane	8470	11,2%	0,31
Kara	11738	20,29%	0,56
Centrale	13317	18,36%	0,51
Plateau	16975	14,46%	0,40
Maritime	6100	19,76%	0,55
*Golfe	190	92,47%	2,58

Pour un renforcement de l'accès universel aux données et à l'électricité dans le contexte socioéconomique, il en ressort que presque la quasi-totalité des régions du Togo nécessite ce projet (le Tableau 3.14) au regard de l'IAD redéfini. Cependant, si l'on s'en tienne au seuil de l'UIT par contre, deux régions émergent prioritairement telles que la région des savanes et la région des plateaux.

### 3.5.2. Evaluation à l'implémentation du service universel accès aux données

Dans le Tableau 3.15, en supposant un déploiement de site GSM à 3 antennes sectorielles (voir annexe B) dans la bande de fréquence de la technologie GSM, on a pour les différentes régions, le nombre de sites équipés de la technologie solaire photovoltaïque en vue de réduire l'écart numérique du monde urbain et rural pour atteindre le service à accès universel. Lorsqu'une politique est adoptée de déployer la LTE en restant toujours dans la bande de fréquence GSM, qui sans doute suscitera encore plus de regain auprès des opérateurs économiques. En se référant, au fabricant Photolia en technologie solaire photovoltaïque.

Tableau 3. 15 : Coût de l'installation et la puissance injectée

Nombre de sites	Fourniture €	Installation €	Puissance Wc	Accumulateurs 2 Volts à Gel-étanches
1	34480	6385	7.066	48
102	3517029	651224	720.720	4896
1000	23714085243	4390973588	7.419.176,47	50400

Certes il faut ajouter qu'il y a une politique nationale du gouvernement à augmenter le taux d'électrification nationale des ménages à 40 % d'ici à l'an 2024 et de 60 % à l'an 2030 [27]. Cependant, une implication des opérateurs économiques de la téléphonie mobile faciliterait cette vision en y prenant la communauté locale comme un facteur additif de la puissance statique (la puissance de la non-transmission). L'étude développée sur la puissance statique a révélé que l'augmentation de cette



dernière n'affecte pas la qualité du réseau, au contraire cela est une avenue très lucrative aux opérateurs à devenir des producteurs en énergie électrique.

### **3.6. Conclusion**

Dans ce chapitre, les méthodes d'optimisation à partir des réseaux de neurone sont utilisées pour l'évaluation du potentiel énergétique à partir du soleil et du vent. Le projet d'intégration des énergies renouvelables à base du photovoltaïque a été évalué, de même que le potentiel énergétique des sites. L'étude a relevé que l'utilisation de l'énergie solaire sera plus fiable que celle de l'énergie éolienne en terme économique. L'étude sur l'accroissement de la puissance émise des nœuds a indiqué que lorsque la puissance rayonnée est élevée, une faible valeur de la densité des femtocellules est optimale pour la maximisation du débit. Cependant, lorsque l'on s'en tient à la puissance injectée des énergies renouvelables, la densité des femtocellules n'est pas important, toutefois l'interférence observée reste préoccupante pour les sources d'énergie éolienne surtout pour les valeurs de la vitesse du vent inférieure à 2 m/s. Pour optimiser, la puissance de rayonnement, il est nécessaire de calibrer les modèles de propagations. Au regard de cela, un algorithme de régression linéaire à une pente a été considéré puis à deux pentes afin de réduire l'erreur due au milieu de propagation. Dans le souci de mieux optimiser la puissance de rayonnement, les réseaux de neurones artificiels (RNA) à multicouche perceptron (MLP) ont été également utilisés pour la calibration du modèle des pertes. Les résultats des RNAs sont avérés meilleurs par rapport à l'algorithme de régression.

Pour réduire l'écart numérique et sélectionner les milieux qui doivent bénéficier du projet de l'intégration des énergies renouvelables à partir du solaire, l'indice à l'accès universel social (IAD) a été définie sur la base du taux de pénétration nationale à l'électricité. Ce paramètre a montré que les régions des Savanes, de la Kara, Centrale et des Plateaux nécessitent ce projet en plus les opérateurs

économiques de la téléphonie mobile peuvent prendre en charge les populations locales en agissant sur la puissance statique des nœuds si une politique nationale est adoptée.

## **Conclusion générale et les perspectives**

Les pays en voie de développement doivent recourir aux sources d'énergies afin de réduire l'effet du réchauffement climatique et garantir une protection de l'écosystème. Dans cette vision, le travail élaboré dans ce mémoire de thèse a évalué l'optimisation a priori de la consommation énergétique par rapport à la première couche du modèle OSI, une prédiction de la disponibilité des sources d'énergie renouvelable, le modèle de propagation, l'efficacité énergétique, et la maximisation de l'efficacité spectrale.

Sur la viabilité de l'utilisation des sources d'énergies renouvelables sous les aléas climatiques, des modèles de prédiction ont été investis par une approche de la machine learning à partir des collectes de mesurées afin d'être utilisés pour les sites à accès difficile. Un modèle de prédiction de l'irradiation solaire a été développé à partir des réseaux de neurones artificiels de type perceptron multicouche. Quant à l'étude sur le vent, un modèle de régression à partir des machines à support de vecteurs a été établi. Ensuite, l'hybridation de l'énergie éolienne et du soleil, a été étudié par un réseau de neurones artificiels de type perceptron multicouche. C'est ainsi que quatre sites ont été trouvés favorables (Lomé, Kpalimé, Atakpamé, et Sokodé voir Annexe A.1).

La récolte de l'énergie éolienne ne sera pas utile au regard de la puissance générée soit 20 MWh/an pour l'expansion du service universel de données. En plus l'utilisation des sources d'énergies hybrides (le vent et le soleil) n'était pas économiquement durable pour les productions électriques pour les puissances inférieures à 10 kWh. Les sites de communications ont une puissance inférieure à ce seuil. En plus, il faut ajouter que l'utilisation de l'énergie photovoltaïque pour alimenter les sites de communication permettra d'améliorer l'efficacité énergétique et spectrale afin d'éviter la réduction des pertes de conversion estimée à près de 15% d'un domaine à un autre, particulièrement de l'alternatif en continu.

L'intégration des énergies renouvelables dans les réseaux de téléphones mobiles contribuera à augmenter le taux de pénétration de l'électricité dans les milieux enclavés, donc à améliorer le service à accès universel. C'est dans cette continuité que l'étude a en plus examiné l'effet de l'intégration des sources d'énergie renouvelable avec l'approche de la programmation linéaire dans le concept d'un

réseau hétérogène prenant en compte une topologie mixte de macro-, pico-, et femtocellules de manière à ce que celles-ci soient proches des utilisateurs domestiques. Dans l'adoption d'une technologie de communication autres que le GSM, comme une technologie cellulaire telle que la LTE, et de future génération, l'étude élaborée dans cette thèse à relever que l'utilisation d'une puissance de rayonnement élevée permet d'avoir une valeur faible densité optimale des cellules de petite taille qui par conséquent reste favorable aux opérateurs économiques de la téléphonie mobile mais le système connaîtra de plus forte interférence. Lorsque la puissance émise est basse la maximisation de l'efficacité spectrale est une fonction linéaire décroissante du nombre de l'augmentation des petites cellules. Cette solution permet de réduire la consommation des terminaux mobiles mais aussi prolonge la durée de vie des batteries toutefois la puissance de rayonnement doit être modérée. Les résultats ont en plus montré que le fait de varier l'irradiation solaire résulte d'une interférence constante lorsque la densité des femtocellules augmente.

En plus en augmentant la puissance statique des sites de communication cela entraîne peu d'interférence lorsque le site est alimenté par une source d'origine photovoltaïque constante d'où la nécessité de l'utilisation des batteries de stockage. Par ailleurs, le fait de prendre en charge la communauté villageoise avec une alimentation d'origine éolienne, le système s'est révélé très limité aux interférences que la source d'origine photovoltaïque l'est moins.

Pour limiter, les interférences il est nécessaire d'optimiser les pertes dues au canal de propagation. Au regard de cela, deux populaires modèles de propagation sont examinés par la méthode de régression linéaire à partir des données recueillies de drive test. C'est dans ce sens que certains paramètres des modèles de SUI et de COST-231 ont été examinés avec les données.

L'hybridation des sources énergétiques hybrides peut se faire à partir des réseaux de neurone pour la gestion efficiente de l'énergie dans les systèmes délicats. C'est au regard de cela que le système à cascade des réseaux de neurones a été introduit mais cela reste un horizon de recherche. En plus, l'utilisation des Fields Programmable Gate Arrays (FPGAs) reste les recherches d'avenir en vue d'avoir

un système de gestion d'alimentation le plus sophistiqué possible. Par une autre voie, la réduction de la consommation énergétique des réseaux cellulaires peut être acquise par l'utilisation des unités radios distantes, la technologie des radios logicielles, et les systèmes avancés de contrôles climatiques pour les climatiseurs. Les systèmes d'alimentation en courant continu avec les systèmes de redresseur-convertisseurs à rendement élevé sont les perspectives de recherches.

**Bibliographie**

- [1] Abdallah Hamini. *New Algorithms for green wired and Wireless communication*. Rennes : Institut des Sciences Appliqués de Rennes, Thèse de doctorat Electronique et Télécommunications, 2013.
- [2] ADEME. *ICT consommation d'énergie gourmande*. ADEME. 2018.  
[https://www.ademe.fr/sites/default/files/assets/documents/integration-enr-recuperation-industrie\\_2018\\_synthese.pdf](https://www.ademe.fr/sites/default/files/assets/documents/integration-enr-recuperation-industrie_2018_synthese.pdf) (accessed 2018).
- [3] \_\_. "Stockage de l'énergie." Mai 2016.  
[www.connaissancedesenergies.org/fiche-pedagogique](http://www.connaissancedesenergies.org/fiche-pedagogique) (accessed juin 20, 2018).
- [4] Ali A. Nora, M. Hebat-Allah Mourad, M. Hany Elsayed, Magdy El-Soudani, H. Hassanein Amer, and M. Ramez Daoud. "General expressions for downlink signal to interference and noise ratio in homogeneous and heterogeneous LTE-Advanced networks." *Journal of Advanced Research* 6 (2016): 923-929.
- [5] Alsina Emmanuel, Federico Marco Bortolini, Mauro Gamberi, and Alberto Regattieri. "Artificial neural network optimization for monthly average daily global radiation prediction." *Elsevier Energy Conversion and Management* 120 (2016): 320-329.
- [6] Andrea Goldsmith. *Wireless Communication*. Cambridge: Cambridge University press, 2008.
- [7] Andrews Jeffrey, G. *Interference cancellation for cellular systems: A contemporary Overview*. Austin: University of Texas, 2005.
- [8] Arnold Oliver, Fred Richter, Gerahrd Fettweis, and Oliver Blume. "Power consumption modelling of different base station types in heterogeneous cellular networks." *Future Network and Mobile Submit*. 2010.
- [9] ARTP. *Evolution des Communications Numériques et du Secteur Postal 2015*. Lomé: ARTP, 2016.
- [10] Ashok Karmokar. "Energy-Efficient Power Allocation Using Probabilistic Interference Model for OFDM-Based Green Cognitive Radio Networks," *Energies* 7 (2014): 2535-2557.
- [11] ARSE AUTORITE DE REGLEMENTATION DU SECTEUR DE L'ELECTRICITE . "RAPPORT D'ACTIVITES 2016." n.d.  
[http://www.arse.tg/wp-content/uploads/2017/12/Rapport\\_Annuel\\_2016.pdf](http://www.arse.tg/wp-content/uploads/2017/12/Rapport_Annuel_2016.pdf).

- [12] Ayang, Albert Ayang, Paul-Salomon Ngohe-Ekam, Bossou Videme, and Jean Temga. "Power Consumption: Base Stations of Telecommunication in Sahel Zone of Cameroon: Typology Based on the Power Consumption-Model and Energy savings." *Journal of Energy, Hindawi Publishing Corporation* 2016 (2016): 1-16 : <http://dx.doi.org/10.1155/2016/3161060>.
- [13] Bachar Idriss, Saleh. *Approches d'Evaluation de l'Accès Universel et Stratégies d'Optimisation : Application au cas de l'Afrique centrale*. Limoges: Université de Limoges, Thèse de doctorat, 2016.
- [14] Banuenumah W., Sekyere F., and Dotche K. A., "Field Survey of Smart Metering Implementation using a Simple Random Method: A case study of New Juaben in Ghana." in *Proceeding of the IEEE Power Africa-IAS*, Accra-Ghana, June 27-30, 2017, pp. 352-357.
- [15] Bharucha Z., and H. Haas. "The distribution of path losses for uniformly distributed nodes in a circle." 2008.
- [16] Blitti K., K. A. Dotche, and K. Diawuo. "Macrocell Antenna Downtilt to Field Data Study in Ghana." *4th IEEE-ICAST*. Kumasi, 2012.
- [17] Bokovi Yao. *Planification optimale des réseaux électriques haute tension par les algorithmes génétiques avec insertion des sources d'énergie électrique renouvelables*. Lomé: Thèse de Doctorat de l'Ecole Nationale Supérieure d'Ingénieurs (ENSI), Spécialité Génie Electrique, 2013.
- [18] Bonnefoi Rémi, Christophe Moy, and Jacques Palicot. *New Macrocell Downlink Energy Consumption Minimization with Cell DTx and Power Control*. France: HAL, <http://hal.archives-ouvertes.fr, hal-01486616>, 2017.
- [19] Bonsu Kusi Ankrah, Kwame Osei Boateng, James Kwabena Oppong, and Koffi Agbeblewu Dotche. "Small Scale Fading Characteristics in Cellular Networks in Ghana." *IGI-GLOBAL International Journal of Interdisciplinary Telecommunications and Networking* 5, no. 3 (2013): 23-33.
- [20] Boshkovska E. D., N. Zlatanov, A. Koelpin, and R. Schober. "Robust Resource Allocation for MIMO Wireless Powered Communication Networks Based on a Non-Linear EH Model." *IEEE Trans. on communication* 65, no. 5 (2017): 1984-1999.
- [21] Bouzigues Marc-Antoine. *Techniques vertes d'optimisation et d'adaptation du lien radio sans fil*. Renne: Université européenne de Bretagne, INSA de Rennes, Thèse de doctorat ,Specialité: Electronique et télécommunications, 2014.
- [22] Boyd Stephen, and Lieven Vandenberghe. *Convex Optimization*. Cambridge: University Press, 2009.



- [23] Bugat Alain. "Impact des TICs sur la consommation d'énergie à travers le monde ." *Academie des technologies, EDP Sciences*, 2015.
- [24] Cacalvani C., N. Nandiraju, D. Nandiraju, D. P. Agrawal, and A. Kumar. "Connectivity Opportunity selection in heterogeneous Wireless Multi-hop Networks." *Pervasive Mobile Computing* 4 (2008): 390-420.
- [25] Carloson Wireless technologies. "Faster Speed, Better Coverage and Lower Cost TV White Space Radio." 04 2011. [www.carloswirelesstelecom.com](http://www.carloswirelesstelecom.com).
- [26] CDG. "WiMAX Forum, Mobile WiMax, [www.wimax.org](http://www.wimax.org)." 2018.
- [27] CEET. "Distribution-Compagnie energie Electrique du Togo." 05 2018. [www.ceet.tg](http://www.ceet.tg) (accessed 06 20, 2018).
- [28] Daquan Feng. "A Survey of Energy-Efficient Wireless Communications." *IEEE COMMUNICATIONS SURVEYS & TUTORIALS, VOL. 15, NO. 1*, 2013: 162-178.
- [29] DCKTN. "Wireless Technology & Spectrum Working Group Energy Efficient Wireless Communications." 30 Mars 2011. [https://connect.innovateuk.org/documents/2849135/3712563/DC KTN+energy+efficient+wireless+communications+positioning+paper+30Mar11.pdf/ec2f5785-167e-43ad-b8cb-9c67702404fc](https://connect.innovateuk.org/documents/2849135/3712563/DC+KTN+energy+efficient+wireless+communications+positioning+paper+30Mar11.pdf/ec2f5785-167e-43ad-b8cb-9c67702404fc) (accessed 06 20, 2016).
- [30] Dharmadhikary S., and R. Bhalerao. *How Much Energy Do We Need: Towards End-Use Based Estimation for Decent Living*. Prayas Energy Group, Pune, India. 2015. (accessed Mars 30, 2018).
- [31] Dotche K. A., and K. Willie Ofofu. "Optimization of the Spectrum and Energy Efficiency Using Coverage Sensitivity Criterion." *International Journal of advanced Computer Sciences and its Applications* 7, no. 1 (2017): 1-5, DOI: 10.15224/978-1-6324.
- [32] Dotche K. A., F. Sekyere, and W. Banuenumah. "Linear Predictive Coefficient for Signal Analysis in Cellular Network Coverage." *Open Access Library Journal*, no. 2759 (2016.).
- [33] Dotche Koffi Agbeblewu, Sibiri N. Bayor, K. Willie Ofofu, and Kwasi Diawuo. "Investigating the Field Strength in Digital Terrestrial Television Broadcast Network: A case Study in Ashanti region." *International Journal of Engineering and Technology* 7, no. 4 (2018): 128-133.
- [34] Dotche Koffi A., Kwasi Diawuo, and K. Willie Ofofu. "Effect of Path Loss on Received Signal Using Greater Accra as Case Study." in *Proceedings of 11th IEEE Wireless*

- Telecommunication Symposium (WTS-2012), London-UK,, 13 Août 2012: 1-6.*
- [35] Dotche Koffi, A., Walter Banuenumah, and K. Willie Ofosu. "Non Regenerative Fiber Backbone Power Loss Budget." *British Journal of Sciences Education Transactions on Networks and Communications* 4, no. 6 (2016): 68-75.
- [36] Dotche Koffi Agbeblewu, and Kwasi Diawuo. "Adaptive Integrated Unit to User's Equipment for the Spectral and Energy Efficiency in Cognitive Networks." *IGI-GLOBAL International Journal of Interdisciplinary Telecommunications and Networking*, 10, no. 1 (2018): 1-19.
- [37] Dotche Koffi Agbeblewu, and Kwasi Diawuo. *Received Power in Antenna downtilt in Cluttered Mobile Environments: Case Study of West Africa Telecom Industry*. London: VDM, 2011.
- [38] Ebhota Virginia C., Joseph Isabona, and Srivastava M. Viranjay "Investigation and Comparison of Generalization Ability of Multi-Layer Perceptron and Radial Basis Function Artificial Neural Networks for Signal Power Loss Prediction ." *International Journal on Communications Antenna and Propagation* 9, no. 1 (2019): 46-54.
- [39] Edita Helsinki. "Energy visions 2030 for Finland." *VTT Energy, Finland: ISBN-951-37-3596-6*. Helsinki, 2001.
- [40] El-Naggar K. M., and Al-Rumah. "Electric Load Forecasting using Genetic Based Algorithm, Optimal Filter Estimator, and Least Error Square Technique: Comparative Study." *Trans. Eng. Comput. Technol* 6 (n.d.): 138-142.
- [41] Falk Antony. *Le photovoltaïque pour tous: Conception et réalisation d'installations*. Le Moniteur, 2010.
- [42] Faruk N. A., A. Ayeni, and M., Y. Muhammad. "Powering cell sites for mobile cellular systems using solar power." *International Journal of Engineering and Technology* 2, no. 5 (2012).
- [43] Feng Y., and Zhang L. "Scenario analysis of urban energy saving and carbon abatement policies: a case study of Beijing city, China." *Procedia Environmental Sciences (Procedia Environmental Sciences )* 13 (2012): 632-644.
- [44] Souchon Foll Laeticia. *TIC et Énergétique : Techniques d'estimation de consommation sur la hauteur, la structure et l'évolution de l'impact des TIC en France*. Paris: Institut National des Telecommunications, Thèses de Doctorat, 2008.
- [45] Fournot Elodie, Lajoine Mathilde, Leblond Adrien, Wang Nian, and Lui Yulin. *Dimensionnement d'une installation éolienne et modélisation informatique d'une pâle d'éolienne*. mémoire de fin d'étude, ROUEN: INSA, 2009.

- [46] Frauke Urban. *Sustainable Energy for Developing Countries: Modelling Transitions to Renewable and Clean Energy in Rapidly developing Countries*. Groningen, Netherland,: Center for Energy and Environmental Studies IVEM, University of Groningen, Ph.D. Thesis, 2009.
- [47] Fraunhofer. “Introducing Fraunhofer’s, Wireless Backhaul Technology -Fokus.” 20 03 2014. (accessed 06 24, 2015).
- [48] Freeman Roger. *Fundamentals of Telecommunications*. New Jersey : John Wiley and Sons Inc., 2005.
- [49] Gadze D. James, Aboagye B. Sylvester, and Agyekum Kwame, A. P., “Real Time Traffic Base Station Power Consumption for Telcos in Ghana.” *International Journal of Computer Science and Telecommunications* 7, no. 5 (2016): 6-13.
- [50] Gelende Erol, Kaluh Deniz, Gündüz Haluk, and Uysal-Biyikoglu Elif. “Energy Harvesting Communication Networks: Optimization and Demonstrations.” *The E-Crops Project , 24 th TIWDC, Green ICT*. Geneve, 2013.
- [51] Ghana Energy Commission. “ Ghana Appliance Energy Efficiency Standards and Labelling Programme.” 2016. <http://www.energycom.gov.gh/index.php/efficiency/standards-and-labelling>.
- [52] Globalcomm, TeleGeography. “Togo minister says mobile broadband should no longer be a luxury.” 03 05 2016. (accessed 06 12, 2018).
- [53] Gong Li and Shi Jing. “On comparing three artificial neural networks for wind speed forecasting.” *Applied Energy* 87 (2010): 2313–2320.
- [54] Gu Yanju. “Greening Geographical Power Allocation for Cellular Networks.” *arXiv:1802.06285v1 [cs.IT] 17 Feb 2018*, 17 Février 2018.
- [55] Guanyao Du, Xiong Ke, Li Dandan, Zhang Yu, and Qiu Zhengding. “Transmission Power Optimization in Two-way Transmission Aware Relay-aided Cellular Networks.” *4th IET International Conference on Wireless, Mobile & Multimedia Networks*. 2011.
- [56] Gunther Auer. “How Much Energy is needed to Run A Wireless Network.” 2011. <https://www.ict-earth.eu/downloads/presentations/2010-11-article05621969.pdf>.
- [57] Gyamfuaa Mintah Jennifer, Ofosu K. Willie, Dotche K. A. and Diawuo K. “Investigation of the User Redial and Its Effect on the Network Congestion in Call Admission: Case Study in Ghana.” In *Advances in Intelligent Systems and Computing, Vol. 881*, 598-607. Warsaw, Poland: Springer, 2019.

- [58] Hagan T. Martin, Demuth B. Howard Mark, Hudson Beale, and Orlando De Jesús. *Neural Network Design*. Oklahoma State: Amazon, 2nd edition, 2014.
- [59] Han Yang, and Molisch. “Spectrum and Energy Efficient Cooperative Base Station Doze.” (IEEE Communication) 2013.
- [60] Hankins Mark. *Installations solaires photovoltaïques autonomes*. Paris 5: Dunod, 2012.
- [61] Harald Grubber. *The economics of Mobile Telecommunications*. London: Cambridge Press, 2004.
- [62] Hasan Ziaul, Hamidreza Boostanimehr, and Bhargava K. Vijay “Green Cellular Networks: A Survey, Some Research Issues and Challenges.” *IEEE Communications Surveys & Tutorials* 13, no. 4 (2011): 524-540.
- [63] Himri Y., *Prospects of wind farm developement*. Elsevier Publishers, pp. 130-138, 2008.
- [64] Hiroshi Harada. “Prototype of 802.11af based White Space WiFi.” *Wireless Innovation Forum and WhiteSpace Alliance*. 2012.
- [65] Holtkamp et al. “Minimizing Base Station Power Consumption.” (IEEE Communication Society) 2013.
- [66] IEA: International Energy Agency. “Energy Technology Perspectives: Strategies and Scenarios to 2050.” *Energy Technology Perspectives*. Paris, 2008.
- [67] Imthiyaz Ali. “Learntelecom.com.” 03 04 2011. [http://learntelecom.com/download/BEAM\\_DIVISION\\_MULTIPLE\\_ACCESS\\_FOR\\_5G.pdf](http://learntelecom.com/download/BEAM_DIVISION_MULTIPLE_ACCESS_FOR_5G.pdf) (accessed January 09, 2012).
- [68] Isabona Joseph, and Srivastava M. Viranjay “A Neural Network based Model for Signal Coverage Propagation Loss Prediction in Urban Radio Communication Environment.” *International Journal of Applied Engineering Research* 11, no. 22 (2016): 11002-11008.
- [69] ISPRES. “Research and Development on Renewable Energies: A Global Report on Photovoltaic and Wind Energy.” *International Science Panel on Renewable Energies*. Paris, 2009.
- [70] ITU -UIT. *ITU-R Recommendation SF.1486: Sharing Methodology between Fixed Wireless Access Systems in the Fixed Service and Very Small Aperture Terminals in the Fixed-Satellite Service in the 3400-3700 MHz band*. Geneva: ITU-R WP4-9S, 2000.
- [71] ITU/ UIT. “Accès et Service Universels : Guide des bonnes pratiques.” 2013.
- [72] Jackson L.B. *Digital Filters and Signal Processing*. Second Edition, Kluwer Academic Publishers, pp. 255-257., 1989.

- [73] Jain et al. "Hierarchical Cellular Structures in High-Capacity Cellular Communication Systems." *International Journal of Advanced Computer Science and Applications*, 2011.
- [74] Jarno Niemelä et al., "Optimum Antenna Down-tilt Angles for Macro-cellular WCDMA network." *EURASIP Journal on Wireless Communications and Networking*, 2005.
- [75] Josset Yves. *Modélisation énergétique de réseaux à antennes distribuées pour les communications sans fil indoor*. Bretagne: Université européenne de Bretagne, Thèse de Doctorat, 2013.
- [76] Kalyanmoy Deb. *Multi-Objective Optimization using Evolutionary Algorithms*. John Wiley and Sons, ISBN: 047187339, 2007.
- [77] Karmokar Ashok, Naeem Muhammad, Anpalagan Alagan, and Jaseemuddin Muhammad. "Energy-Efficient Power Allocation Using Probabilistic Interference Model for OFDM-Based Green Cognitive Radio Networks." *Energies*, no. 7 (2014): 2535-2557.
- [78] Klas Johansson. *Cost effective deployment strategies for heterogeneous wireless network*. Stockholm: Royal University of Stockholm, Kungliga Tekniska Hogskolan KTH, 2007.
- [79] Kodjo Koffi Mawugno, Bedja Koffi-Sa, Ajavon Ayité, Sénah, Faye A., R. M., and Lishou C. "Neural network for predictive control of the mechanism of orientation of wind turbine." *Journal des Sciences Pour l'Ingénieur (JSPI)*, no. 9 (2008): 75-85.
- [80] Konstantinos B. Baltzis. "A Semi-Stochastic Propagation Model for the Study of Beam Tilting in Cellular Systems." *International Journal of Antennas and Propagation*, 2008, Hindawi Publishing Corporation ed.
- [81] Koutitas George, and Demestichas Panagiotis. "A Review of Energy Efficiency in Telecommunication Networks." *Telfor Journal 2*, no. 1 (2010): 2-7.
- [82] Lepers Catherine. *Projet N-Green*. IMTECH. 10 07 2018. (accessed 08 20, 2018).
- [83] Lévy-Bencheton cédrick. *Etude des relais multi-mode sous contrainte d'énergie dans un contexte de radio logicielle*. Lyon: INSA, Thèse de Doctorat, 2011.
- [84] Li Chang, Zhang Jun, and Letaief K. B. "Energy Efficiency Analysis in Small-Cell Networks." (<http://arxiv.org/>) 1306, no. 1 (2012).
- [85] Li Guo, Zhuang and Ye. "On Efficient Ressource Allocation for Cognitive and Cooperative Communication." (IEEE Communication) 2013.
- [86] Lopez-Perez et al. "Power Minimization Based Resource Allocation for OFDMA FemtoCell Networks." 2013.

- [87] Luis M. et al. "Challenges and Enabling Technologies for Energy Aware in Mobile Radio Network." *IEEE Communications Magazine*, 2010: 66-72.
- [88] Maral Gérald. *VSAT Networks*. New-Jersey: Wiley and Sons, Ltd, 2nd Edition, 2003.
- [89] MathWorks. *Matlab software version 8*. [www.mathworks.com/help/techdoc/rn/f14-998197.html](http://www.mathworks.com/help/techdoc/rn/f14-998197.html), n.d.
- [90] Mir T. L. Dai, Y. Yang, W. Shen, and B. Wang. "Optimal femtocell density for maximizing throughput in 5G heterogeneous networks under outage constraints." in *Proc. IEEE 86th Veh. Technol. Conf. (IEEE VTC'17 Fall)*. Toronto-Canada, 2017.
- [91] Mitchell T. M. *Machine Learning: Series in Computer Sciences*. Vol. 4. McGraw-Hill, 1997.
- [92] Montgomery C. Douglas, and Runger C. George. *Applied Statistic and Probability for Engineers*. United States of America: Wiley, 2014.
- [93] Morosi Simone, Piunti Pierpaolo, and Del Re Enrico. *Energy Efficient Sleep Mode Management for Cellular Networks*. Genoa, Italy: ETSI Workshop on Energy Efficiency, 2012.
- [94] NASA. *Meteorology and Solar Radiation site*. NASA. 2018. <https://eosweb.larc.nasa.gov/cgi-bin/sse/retscreen.cgi?email=rets%40nrcan.gc.ca&step=1&lat=-30.503&lon=29.364&submit=Submit>.
- [95] Nordman Erik, Barrenger Abigail, Crawford Jessica, McLaughlin Jacob, and Wilcox Chad. "Options for achieving Cape Verde's 100% renewable electricity goal: a review." *Island Studies Journal* 14, no. 1 (2019): 41-58.
- [96] Nwaymi Loutfi. *Energie et Télécommunication: un rapprochement algorithmique*. 28 04 2017. [www.imtech.fr](http://www.imtech.fr) (accessed 08 20, 2018).
- [97] Odarno L., Agarwal A., Devi A., and Takahashi H. *Strategies for Expanding Access to Electricity Services for development*. Washington, DC: World Resources Institute, 2016.
- [98] Oliver Blume, Zeller Dietrich, and Barth Ulrich. "Approaches to Energy Efficient Wireless Access Networks." n.d.
- [99] Ouedraogo S. Nadia, *Energy futures modelling for African countries: LEAP model application*. Addis Abeba: UNU-Wider, 2017.
- [100] Ouedraogo Seydou. *Optimisation Multi-critère d'une centrale Hybride à Energie Hybride*. Lomé: Université de Lomé, ENSI, Thèse de doctorat en Génie Electrique, 2018.

- [101] Ounis Anis. *Optimisation de la capacité et de la consommation énergétique dans les réseaux maillés sans fil*. Lyons: INSA, Thèse de Doctorat en Informatique et Mathématiques, 2013.
- [102] Panagiotis, Diamantoulakis D. *Resource allocation in wireless networks with energy constraints*. Thessaloniki: Aristotle University of Thessaloniki, Ph.D. thesis in Telecommunication Engineering, 2018.
- [103] Parker Michael. *Digital Signal Processing 101: Implementation Using FPGAs*. 2<sup>e</sup> édition, 2017.
- [104] Pousset Yannic. “Exemples d’optimisations énergétiques dans les systèmes radios sans fil.” *URSI Journées Scientifiques*. Paris, France, 2016.
- [105] PVSyst SA. *Study of Photovoltaic Systems*. PVSyst. 18 03 2016. [www.pvsyst.com](http://www.pvsyst.com).
- [106] Qing Xiangyun. “Statistical analysis of wind energy characteristics in Santiago island, Cape Verde.” *Renewable Energy, Elsevier* 115 (2018): 448-461.
- [107] Rao B. Yaya, and O. Abraham Fapojuwo. “A Survey of Energy Efficient Resource Management Techniques for Multicell Cellular Networks.” *IEEE Communication Surveys and Tutorials* 16, no. 1 (2014): 154-180.
- [108] Rifkin Jeremy. *The Third Industrial Revolution: How lateral Power is Transforming Energy, The Economy and the World*. New York, 2011.
- [109] Rob Flickenger. *Wireless networking in Developing World : A practical guide to planning and building low-cost telecommunication infrastructure*. London: Hacker Friendly, 2007.
- [110] Salami A. A., Tiem Sounou, Lishou C., and Bedja K., “La logique floue pour la prédiction de la moyenne horaire de la vitesse du vent sur le site de Lomé.” *Journal des Sciences Pour l'Ingénieur, UCAD*, no. 8 (2007): 88-96.
- [111] Salami A. Akim, Ajavon A. A. Sénah, Kodjo K. Mawugno, and Bedja Koffi-Sa. “Etude de la variabilité mensuelle du potentiel éolien sur le site de Lomé: Contribution à un choix optimal des aérogénérateurs pour ce site.” *J. la Rech. Sci. l'Université Lomé* 8, no. 1 (2015).
- [112] Salami Adekunlé A., Ajavon Ayité S. A., Dotche K. A., and Bedja Koffi-Sa. “Propagation Models Calibration in Cellular Networks: A Case Study in Togo.” *IEEE Future Technologies Conference, Vancouver 29-30 November 2017*: 923-928.
- [113] Salami Adekunlé Akim. *Modélisation du vent à partir des méthodes d’analyse de données imparfaites : Etude et réalisation*

- d'un outil d'aide à la décision pour la caractérisation du potentiel éolien, la prédiction de vitesses du vent et l'optimisation du dimensionnement des aéro.* Lomé: Université de Lomé, Thèse de doctorat unique en sciences de l'ingénieur, option: Génie Electrique, 2008.
- [114] Salami Adekunlé Akim, Ayité S. A. Ajavon, Koffi Mawugno Kodjo, et Bedja Koffi-Sa. "Prédiction de la moyenne horaire de la vitesse du vent sur le site de Lomé par réseau de neurones." *Revue du CAMES Sciences Appliquées et de l'Ingénieur* 2, no. 1 (2017): 1-12.
- [115] Salami Adekunlé Akim, Ajavon Ayité Sénah Akoda, Dotche Koffi Agbeblewu, et Koffi-Sa Bedja. "Electrical Load Forecasting Using Artificial Neural Network: The Case Study of the Grid Inter-Connected Network of Benin Electricity Community (CEB)." *American Journal of Engineering and Applied Sciences* 11, no. 2 (2018): 471-481.
- [116] Salami Adekunlé Akim, Ajavon Ayité Sénah Akoda, Dotche Koffi Agbeblewu, et Bedja Koffi-Sa. "Investigating the Charge Time of Super-capacitors using Stern's Model." *IEEE Xplore Proceedings of the Power Africa Conference and IAS, Accra*, 13 Août 2017: Accra, pp.105-108.
- [117] Salami Adekunlé Akim, Kodjo Koffi Mawugno, Ajavon Ayité Sénah Akoda, Dotche Koffi Agbeblewu, et Bedja Koffi-Sa. "Maximum Likelihood Based Approach for Weibull's Distribution Parameters Estimation for Wind Energy Applications." *International Journal of Engineering and Technology* 7, no. 4 (2018): 6631-6648.
- [118] Seo Inkwon, Won Seyoung, and Kim Younglok. "Performance Analysis of High Order Modulation Schemes in the wireless Communication System." Gangwon-Do: IEEE, 2007.
- [119] Sunil Vadgama. "Trends in Green Wireless Access." *Fujitsu Sci. Tech.* 45, no. 04 (2009): 404-408.
- [120] Taha. "Efficient Usage of Renewable Energy in Communication Systems using Dynamic Spectrum Allocation and Collaborative Hybrid Powering, 2016." 2016. <http://web.ngr.oregonstate.edu/~hamdaoui/papers/2016/taha-twc-16.pdf>.
- [121] TCHODOU Samah B., KANAGAVEL P., S. Mary REXLINE, « Mapping of wind ressources in different geographical regions of Togo for 10m and 80m », *International Journal of Multidisciplinary and Current Research*, Vol 5, Juillet 2017
- [122] The IET Communication. "Demand Attentive Networks." (THEIET) 2013.



- [123] Third Generation Partnership Protocol. *Technical specification group radio access network*. 3GPP, 2010.
- [124] Tombaz Sibel, Paolo Monti, Wang Kun, Anders Västberg, Marco Forzati, and Jens Zander. “Impact of Backhauling Power Consumption on the Deployment of Heterogeneous Mobile Networks.” 2012.
- [125] Touzri Taha, Mahdi Ben Ghorbel, Bechir Hamdaoui, Mohsen Guizani, and Bassem Khalfi. “Efficient Usage of Renewable Energy in Communication System Using Dynamic Spectrum Allocation and Collaborative Hybrid Powering.” *IEEE Global Communications Conference (GLOBECOM)*. San Diego, <http://web.engr.oregonstate.edu/~hamdaoui/papers/2016/tahatwc-16pdf>, 2015.
- [126] Tymvios F. S., and C. P. Jacovides. “Comparative study of Angströms and artificial neural networks methodologies in estimating global solar radiation.” *Solar Energy* 78 (2005): 752-762.
- [127] Vechiu Ionel. *Modélisation et Analyse de l'intégration des énergies renouvelables dans un réseau autonome*. Université du Havre, 2005.
- [128] WBGU (German Advisory Council on Global Change). “World in Transition – Towards Sustainable Energy Systems.” Berlin, 2008.
- [129] Wissem Benali. *Modélisation et Optimisation de la consommation énergétique d'un système de communication Wi-Fi*. Bretagne Pays de Loire: IMT-Atlantique, Thèse de doctorat en Télécommunications, 2017.
- [130] Xu, Zhang. “Throughput Optimal Policies for Energy Harvesting Wireless Transmitters with non Ideal Circuit Power.” (IEEE Communication Society) 2013.
- [131] Yan, C., Oliver B., G Azeddine, C. Antonio, and W. Chi-En. “Energy Saving: Scaling Network Energy Efficiency Faster than Traffic Growth.” *IEEE WCNC Workshop on Future green End-to-End Wireless Communication*. Shanghai, China,, 2013.
- [132] Yang et al. “A multi-layered OFDM system with parallel transmission for multicell cooperative cellular networks.” *EURASIP, Journal on Wireless Communications and Networking*, 2012, 2012 ed.
- [133] Yong-Hoon, Choi, Lee Jungerl, Back Juhoon, and Park, Suwon. “Energy Efficient Operation of Cellular Network Using On/Off Base stations.” *Hindawi Publishing Corporation, International Journal of Distributed Sensor Networks* 2015 (2015): 1-7.

- [134] Zhang Yan, and Nirwan Ansari. "Hierarchical Energy Optimization for Data Center Networks." *IEEE Systems Journal* 9, no. 02 (2015): 406-4015.
- [135] Zhihang et al. "Energy spectral efficiency tradeoff in downlink OFDMA networks." (Int. J. Commun. Syst. wileyonlinelibrary.com) 2014.
- [136] Zhou Liu, Tian Pan, and Yang Shi. "Two-Stage Cooperative Multicast Transmission with Optimized Power Consumption and Guaranteed Coverage." (IEEE Communication Society) 2013.
- [137] Zhuang Weihua, and Yong Zhou. "A Survey of Cooperative MAC Protocols for Mobile Communication Networks." 2013.
- [138] Ziaul Hasan et al. "Green Cellular Networks: A Survey, Some Research Issues and Challenges." *International Journal of Emerging Technology and Sciences*, 2013.

## Listes des publications

<b>Chapitres</b>	
1	<b>Dotche K. A.</b> , Salami A. A., Kodjo K. M., Sekyere F., Bedja K-S. (2020) "Studying the Impacts of the Renewable Energy Integration in Telecommunication Systems: A Case Study in Lome". In: Arai K., Bhatia R., Kapoor S. (Eds) Proceedings of the Future Technologies Conference (FTC) 2019. Advances in Intelligent Systems and Computing, <b>AISC Vol. 1070</b> . Springer Nature Switzerland, pp. 758-780
<b>Articles des Journaux de Recherches Scientifiques</b>	
2	<b>Koffi A. Dotche</b> , A. Akim Salami, A. Sénah A. Ajavon et Koffi-Sa Bedja, " <i>Les Energies Renouvelables pour une Communication Verte et les Enjeux du Service Accès Universel</i> ", Journal Scientifique de Recherches de l'Université de Lomé, <b>Vol. 21 (4-1), décembre 2019, pp. 8-26</b>
3	A. Akim Salami, Koffi M. Kodjo, A. Sénah A. Ajavon, <b>Koffi A. Dotche</b> and Koffi-Sa Bedja, "Maximum Likelihood based approach for Weibull parameters estimation for wind Energy applications". Int. Journal of Engineering and Technology (UAE), <b>Vol. 7 (4-36)</b> , December 2018, <b>pp. 6631-6648</b>
4	A. Akim Salami, A. Sénah A. Ajavon, <b>Koffi A. Dotche</b> and K. Bedja, " <i>Electrical Load Forecasting Using Artificial Neural Network: The Case Study of the Grid Inter-Connected Network of Benin Electricity Community (CEB)</i> ", American Journal of Eng. & Applied Sciences, <b>Vol. 11 (2)</b> , April 2018, <b>pp.471-481</b> .
<b>Articles de conférences</b>	
5	<b>Koffi A. Dotche</b> , A. Akim Salami, Koffi M. Kodjo, Yawa Pamela C. D. BLU, and Yao Essemu Julien DIABO, " <i>Evaluating Solar Energy Harvesting using Artificial Neural Networks : A case study in Togo</i> ", In <i>Proceedings of the 2019 IEEE-International conference on High Technology for Sustainable Development HiTECH 2019, 9-12 October 2019, Sofia, Bulgaria</i> , pp. 1-5. Doi: 10.1109/HiTech48507.2019.9128285
6	<b>Koffi A. Dotche</b> , A. Akim Salami, Koffi M. Kodjo, François Sekyere and Koffi-Sa Bedja, " <i>Artificial Neural Network Approach for the Integration of Renewable Energy in Telecommunication Systems</i> ", In <i>Proc. of the IEEE PAC-IAS, August 20-23, 2019 ; Abuja, pp. 279-284</i> . DOI: 10.1109/PowerAfrica.2019.8928774 , <b>ISBN: 978-1-7281-1010-3</b>
7	<b>Koffi A. Dotche</b> , A. Akim Salami, Koffi M. Kodjo, Hadname Ouro-Agbake and Koffi-Sa Bedja, " <i>Wind Speed Prediction Based on Support Vector Regression Method: a Case Study of Lome-Site</i> ", In <i>Proc. of the IEEE PAC-IAS, August 20-23, 2019 ; Abuja, pp. 267-272</i> . <b>DOI: 10.1109/PowerAfrica.2019.8928724, ISBN: 978-1-7281-1010-3</b>
8	A. A. Salami, A. S. Ajavon, <b>Koffi A. Dotche</b> , and Koffi-Sa Bedja, "Propagation Models Calibration in Cellular Networks: A Case Study in Togo", in <i>Proceedings of the IEEE Future Technologies Conference, 2017, Vancouver-Canada, November 29-30, pp. 923-928</i> .

## **Annexe**

## A. Données relatives à l'irradiation solaire et la vitesse du vent

### A.1. Les données du vent de l'irradiation solaire

Cette section présente quelques compléments sur la classification du vent.

Tableau A.1 : La classe du vent

La classe de puissance	La densité moyenne (m <sup>2</sup> /s)	La vitesse du vent (m/s)
1	<100	<4,4
2	100-150	4,4-5,1
3	150-200	5,1-5,6
4	200-250	5,6-6,0
5	250-300	6,0-6,4
6	300-350	6,4-7,0

### A2. Evaluation de la corrélation pour l'hybridation des sources solaires et éoliennes

Dans le Tableau A2 (ci-contre) le coefficient de corrélation a été calculé pour vérifier la faisabilité de l'hybridation des énergies solaires et éoliennes à partir des données du Tableau A4. Une valeur négative du coefficient de corrélation dans le Tableau A.2 indique que la viabilité de l'hybridation de l'utilisation de l'énergie éolienne et du soleil, est favorable. C'est ainsi que quatre sites (Lomé, Kpalimé, Atakpamé, et Sokodé) peuvent être notées.

Tableau A.2 Coefficients de corrélation (CC) des énergies

Région	Ville	CCref
Savanes	Dapaong	0,3916
	Mango	0,1719
Kara	Kara	0,2787
	Bassar	0,2850
Centrale	Sokodé	-0,021
Plateaux	Atakpamé	-0,0025
	Kpalimé	-0,107
Maritimes	Aného	0,2687
	Tabligbo	0,39
	Lomé	-0,252

Table A.3 : Caractéristiques de l'éolienne

<b>Désignation</b>	<b>Jimp 30</b>
Puissance nominale	20 kW
Puissance maximale	30 kW
Production annuelle estimée	42500 kWh à 5m/s
Vitesse minimal du vent	3 m/s
Vitesse maximal du vent	37,5 m/s
Diamètre du rotor	11,6m
Surface balayée	106 m <sup>2</sup>
Poids turbine	900 kg
Vitesse de survie	42,5m/s
Mât	24 ou 30m
Axe	Horizontal
Pales	Résine et fibres de verres
Orientation	Face au vent avec safran
Contrôle survitesse	Pales à pas variables et électronique
Raccordement réseau	triphase

**Tableau A.4: Donnée annuelles de la vitesse du vent (V) pour quelques sites du Togo**Légende: G: Irradiation solaire en  $\text{kwh/m}^2/\text{j}$  ; V: Vitesse du vent à 50 m d'altitude par rapport au niveau de la mer

Mois	Lomé		Aného		Tabligbo		Kpalimé		Atakpamé		Sokodé		Bassar		Kara		Mango		Dapaong	
	G	V	G	V	G	V	G	V	G	V	G	V	G	V	G	V	G	V	G	V
Janvier	5,43	5,43	5,43	5,43	5	2,63	5,43	5,43	5,43	5,43	5,43	5,43	5,43	2,97	5,55	2,94	5,97	2,97	5,41	2,95
Fevrier	5,61	4,33	5,61	4,23	4,61	3,24	5,51	3,51	5,88	3,21	6,03	2,69	6,04	2,67	6,08	2,68	6,05	2,8	6,05	2,79
Mars	5,52	4,45	5,52	4,17	4,4	3,32	5,7	3,78	5,8	3,53	5,93	3,23	6,1	3,31	6,09	3,29	6,2	3,39	6,2	3,37
Avril	5,36	4,2	5,36	3,59	4,2	3,3	5,7	3,3	5,66	3,04	5,82	2,85	6,03	3,02	5,99	3,02	6,14	3,23	6,14	3,21
Mai	5,06	3,56	5,06	3,21	4,3	2,97	5,56	3,09	5,4	3,17	5,54	3,21	5,61	3,36	5,65	3,32	5,91	3,44	5,91	3,42
Juin	4,47	3,82	4,47	3,12	4,2	3,2	5,16	2,86	4,84	2,85	4,94	2,8	5,11	2,99	5	2,98	5,33	3,13	5,33	3,12
Juillet	4,48	4,96	4,48	4,06	4,6	3,78	4,6	3,92	4,44	3,56	4,45	3,23	4,67	2,98	4,56	3,07	4,9	3,08	4,9	3,06
Août	4,34	5,47	4,34	4,27	5,1	4,02	4,48	4,12	4,22	3,72	4,19	3,28	4,46	2,89	4,33	2,99	4,68	2,9	4,68	2,88
Septembre	4,56	4,84	4,56	4,06	5	3,18	4,36	4,11	4,58	3,61	4,62	3,17	4,8	2,6	4,75	2,71	5,07	2,52	5,07	2,5
Octobre	4,95	3,69	4,95	3,17	4,8	2,43	5,03	3,28	5,18	2,85	5,21	2,63	5,4	2,52	5,31	2,51	5,7	2,49	5,7	2,48
Novembre	5,08	3,31	5,08	3,56	4,8	2,35	5,15	3,7	5,5	3,36	5,63	3,13	5,62	2,84	5,7	2,91	5,66	2,85	5,66	2,84
Decembre	5,22	3,05	5,22	3,59	4,9	2,23	5,24	2,94	5,53	2,97	5,65	2,74	5,68	2,9	5,71	2,89	5,58	3,05	5,58	3,04
Moyenne annuelle	5,01	4,08	5,01	3,77	4,66	3,05	5,08	3,5	5,22	3,28	5,3	3	5,42	2,92	5,39	2,94	5,55	2,99	5,55	2,97

Tableau A.5 : Résultats principaux de la simulation dans PVSyst pour un site de 4kW alimenté par panneau solaire

Mois	GlobHor kWh/m <sup>2</sup>	T°Amb °C	GlobInc kWh/m <sup>2</sup>	GlobEff kWh/m <sup>2</sup>	Earray MWh	E_Grid MWh	EffArrR %	EffSysR %
Janvier	170.3	21.29	197.9	193.0	15.64	14.58	12.85	11.98
Février	143.8	22.31	153.6	149.2	12.24	11.4	12.96	12.07
Mars	166.6	21.92	160.6	155.5	12.76	11.87	12.93	12.02
Avril	153.4	20.91	133.7	128.8	10.86	10.09	13.22	12.27
Mai	163.6	20.80	128.9	123.8	10.54	9.79	13.30	12.35
Juin	156.8	19.76	117.2	111.8	9.64	8.94	13.38	12.40
Juillet	145.7	19.92	113.7	108.9	9.30	8.59	13.30	12.29
Août	146.5	19.94	121.5	116.8	9.95	9.21	13.31	12.32
Septembre	167.8	20.22	155.8	150.7	12.59	11.72	13.14	12.23
Octobre	165.9	21.21	171.2	166.4	13.53	12.60	12.85	11.97
Novembre	158.9	20.62	179.3	174.8	14.04	13.09	12.73	11.87
Décembre	165.9	21.32	199.7	195.0	15.69	14.63	12.78	11.91
Moyenne annuelle	1905.2	20.85	1833.1	1774.6	146.79	136.50	13.02	12.11
Légendes:	<u>GlobHor</u>	Irradiation globale Horizontale			<u>Earray</u>	Energie effective sortie champ		
	<u>T°Amb</u>	Température ambiante			<u>E_Grid</u>	Energie injectée dans le réseau		
	<u>GlobInc</u>	Irradiation globale Incidente			<u>EffArrR</u>	Eff. Eout champ/surf. brute		
	<u>GlobEff</u>	Irradiation globale effective			<u>EffSysR</u>	Eff. Eout système/surf. brute		



## B. Le modèle de Stanford University Interim

L'Université Intérimaire de Stanford (SUI) en concertation avec le groupe IEEE 802.16 du WiMAX ont développé le modèle connu de SUI pour les applications utilisant la boucle locale radio en Angleterre et dans les bandes de fréquence au-delà de 2 GHz.

$$Lp = A + 10\gamma \log\left(\frac{d}{d_0}\right) + s + L_f + L_h$$

où  $A$  et  $\gamma$  sont donnés pour  $d > d_0$   $A = 20 \log\left(\frac{4\pi d_0}{\lambda}\right)$  et  $\gamma = a - b \cdot h_{BTS} + \frac{c}{h_{BTS}}$

Les constantes  $a$ ,  $b$ ,  $c$  caractérisant les catégories de terrain de type A, B et C ; montagneux avec une forte densité des arbres, milieu intermédiaire, et de plaines avec peu de montagnes respectivement sont inscrites dans le Tableau B.1.  $L_f$  et  $L_h$  sont déterminés par

$$L_f = 6 \log_{10}\left(\frac{f}{2000}\right) \text{ et } L_h = \begin{cases} -10,8 \log\left(\frac{h_{BTS}}{2}\right) & \text{pour types de terrain A et B} \\ -20 \log\left(\frac{h}{2}\right) & \text{pour types de terrain C} \end{cases}$$

$L_f$  et  $L_h$  sont des facteurs de corrections par rapport à la fréquence et à la hauteur du mobile; et  $s$  est l'effet de masque compris entre  $8,2 \text{ dB} < s < 10,6 \text{ dB}$ .

Tableau B.1: Constantes du modèle SUI en fonction des catégories de terrain

	Catégorie A	Catégorie B	Catégorie C
$a$	4,6	4	3,6
$b$	0,0075	0,0065	0,005
$c$	12,6	17,1	20

Le nombre de BTS pour une couverture géographique est exprimé par

$$N_{BTS} = \frac{c_{sr}}{c_{sc}}$$

$c_{sc} = 3,14 k * r^2$  avec  $k$  le facteur de la fréquence de réutilisation pour la technologie de transmission. Pour un site à trois secteurs  $k = \frac{1}{3} \left(\frac{D_{ISI}}{r}\right)^2$ ,  $D_{ISI}$  est la distance inter-cellule ayant une valeur de 1732 m en conformité avec la 3GPP2,  $r$  est le rayon de la macro-cellule, et  $c_{sr}$  la surface requise à couvrir pour une technologie.

### C. La probabilité de la fiabilité de la couverture

$P_{out, edge}$  est fonction de la probabilité de laquelle un niveau du signal  $P_{Rx}$  est supérieur à un niveau prédéterminé  $P_{Thr}$ .

$$P_{cov, edge}[P_{Rx} > P_{Thr}] = \frac{1}{2} * \left(1 - erf \frac{P_{Thr} - P_{Rx}}{\sigma\sqrt{2}}\right) \quad (C.1)$$

La couverture A est exprimée par :

$$A = Q(a) + \exp\left(\frac{2 - 2ab}{b^2}\right) Q\left(\frac{2 - ab}{b}\right)$$

la fiabilité de la couverture à l'extrémité de la cellule dans une portion de surface  $dA$ , est donnée par:

$$\begin{aligned} P_{rel}A_{cell}([P_{Rx} > P_{Thr}]) &= \frac{1}{\pi R^2} * \int P_{cov, edge}[P_{Rx} > P_{Thr}] * dA \quad (C.2) \\ &= \frac{1}{\pi R^2} \int_0^{2\pi} \int_0^R P_{cov, edge}[P_{Rx} > P_{Thr}] x dx . d\theta \end{aligned}$$

$$P_{rel}A_{cell}[x|R] = Q\left(c + x \ln R\right) + \frac{1}{R^2} * \exp\left(-\frac{2c}{x} + \frac{2}{x^2}\right) * \left[1 - Q\left(c + x * \ln R - \frac{2}{x}\right)\right]$$

$$\begin{aligned} \text{Où } c &= \frac{P_{Thr} - P_{Rx}}{\sigma\sqrt{2}} \quad c = \sqrt{2}a \quad \text{et } x = \sqrt{2}b, \quad Q(x) = \frac{1}{2} * erfc \frac{x}{\sqrt{2}} \quad a = \frac{P_{Thr} - P_{Rx}}{\sigma\sqrt{2}} \\ \text{et } b &= \frac{10.n.log_{10} e}{\sigma\sqrt{2}} \quad \text{ayant pour complément } erfc(x) = 1 - erf(x), \end{aligned}$$

Les bornes supérieures de la couverture sont exprimées par

$$\frac{2 * \exp\left(-\frac{a^2}{2}\right)}{(1 + a^2)[b^2 + (2 - ab)^2]\sqrt{2\pi}} < A < \frac{2 * \exp\left(-\frac{a^2}{2}\right)}{a(2 - ab)\sqrt{2\pi}} \frac{2}{b} > a > 0$$

La probabilité de la fiabilité pour qu'un signal reçu soit supérieur à une valeur de seuil est donnée par :

$$P_{rel}A_{cell}([P_{Rx} > P_{Thr}]) = \frac{1}{2} * \left(1 - erf(a) + e^{\frac{1-2.ab}{b^2}} * \left(1 - erf\left(\frac{1-ab}{b}\right)\right)\right) \quad (C.3)$$

avec  $0 \leq \delta \leq 2\pi$

## D. Transmission optimisée pour le terminal mobile

La densité de puissance spectrale de chaque nœud  $p_{t,k_{DL}}$ , qui sert un utilisateur mobile,  $\overrightarrow{m_{l,k}}$ , est donnée par :

$$p_{t,k_{DL}} = (2^{\varepsilon_0} - 1)(I_m + N_0) * P_{L,k} * a_{i,k} \quad (D.1)$$

La densité de puissance spectrale du nœud CBS au femto, servant un utilisateur mobile,  $p_{t,k_{DL}}$ , est exprimée par:

$$p_{t,k_{DL}} = (2^{\varepsilon_0} - 1)(I_m + N_0) * P_{L,k}(\overrightarrow{k_{b,f}}) \quad (D.2)$$

Sachant que la puissance de transmission  $P_{T_{ik}}$ , est liée à la bande passante,  $B_{i,k}$  et la densité de puissance spectrale,  $p_{t,k}$ , du nœud émetteur (transmettant), il s'en suit que:

$$P_{T_{ik}} = p_{t,k} * B_{i,k} \quad (D.3)$$

et en supposant qu'une bande passante,  $B_0$ , soit allouée à chaque utilisateur,  $\overrightarrow{m_{l,k}}$ , dans une cellule k; le débit de la liaison montante, et de la liaison descendante est  $T_0$ , ce qui correspond à

$$T_0 = B_{i,k_{DL}} * \eta_{SE_{i,k_{DL}}} \quad (D.4)$$

et

$$B_{i,k_{Upl}} = B_0 - \frac{T_0}{\eta_{SE_{i,k_{DL}}}} \Rightarrow B_0 = B_{i,k_{Upl}} + B_{i,k_{DL}}$$

avec est  $B_{i,k_{Upl}}$  et  $B_{i,k_{DL}}$  la bande passante de la communication en liaison ascendante et descendante respectivement,  $\eta_{SE_{i,k_{DL}}}$  est l'efficacité spectrale de la liaison descendante.

Par ailleurs l'efficacité spectrale de l'utilisateur mobile  $\overrightarrow{m_{l,k}}$  sur la liaison montante peut être écrite par :

$$\eta_{SE_k}(i) = \log_2 \left( 1 + \frac{p_{MT_{i,k}} P_{L,k}^{-1}}{(N_0 + I_m) * B_{i,k_{Upl}}} \right) \quad (D.5)$$

Sur le principe de la balance d'équilibre de puissance sur les liaisons montante et descendante, l'efficacité spectrale de puissance d'un nœud est atteinte en même temps que l'efficacité spectrale d'un utilisateur mobile. La densité spectrale de puissance de l'utilisateur mobile en liaison montante peut être obtenue comme suit:

$$P_{MS_{i,k}} = \left( 2^{\varepsilon_0/B_{i,kUpl}} - 1 \right) (N_0 + I_0) * B_{i,kUpl} * P_{L,k} \quad (D.6)$$

La puissance transmise par un nœud k vers le mobile est exprimée par :

$$p_{T_{i,k}} = (2^{\varepsilon_0} - 1)(N_0 + I_0) * P_{L,k} \quad (D.7)$$

Pour une cellule donnée, la densité spectrale de puissance minimale pour la transmission de l'utilisateur mobile est donnée par:

## RESUME

Les systèmes des télécommunications, particulièrement les réseaux de communications cellulaires terrestres utilisent les systèmes énergétiques hybrides (SEH) composés : de la source (tension) du secteur, de groupes électrogènes, d'accumulateurs et récemment les énergies renouvelables. L'introduction de ces dernières requiert une prévision de sa disponibilité pour sa récolte surtout dans une politique d'accès universel à l'électricité dans les pays sub-sahéliens comme le Togo où le taux de pénétration de l'électricité est faible. Cependant, l'introduction des énergies renouvelables pourrait entraîner une dégradation de la qualité de services des opérateurs (QoS), et la qualité d'expérience d'utilisateur (QoE).

Cette étude a examiné des approches d'optimisation des systèmes énergétiques de télécommunications et l'intégration des énergies renouvelables pour la vulgarisation du service accès universel (voix et données, et électricité). Le travail a évalué dès l'abord, l'optimisation a priori a consisté à utiliser des réseaux de neurones artificiels pour évaluer les potentiels et la disponibilité des énergétiques renouvelables telles que : le vent et le soleil sur certains sites sélectionnés du pays. En deuxième point, par une approche numérique, la maximisation du débit dans le déploiement des femto-cellules supportées par une macro-cellule a été étudiée. Par la suite l'optimisation de la perte de puissance due au médium de propagation (l'interface air) est étudiée à partir des données mesurées (de drive test), dans le but de réduire la consommation d'énergie allouée aux modèles de propagation et à la puissance effective rayonnée. Enfin, les atouts d'alimenter les sites de communication à partir de l'énergie solaire sont explorés pour différentes régions du Togo.

**Mots clés :** communication verte, efficacité énergétique, efficacité spectrale, énergie renouvelable, modèle de propagation, optimisation a-priori, réseaux de neurones artificiels

**ABSTRACT--***The optimization of the energy consumption is essential for communication systems that have a reputation for being greedy for electrical energy. Telecommunication systems, particularly cellular communications networks, make the use of hybrid energy systems that are composed of the source of the sector, generators, accumulators and recently renewable energies. The introduction of the latter requires a forecast of its availability for energy harnessing, especially in a policy of universal electricity access for all since the penetration rate of conventional electricity is low. In fact, the introduction of the renewable energy could affect the Quality of Service (QoS), and the Quality of User Experience (QoE).*

*This study examines some approaches to energy optimization of telecommunication systems and the integration of renewable energy for the extension of the universal access service (data and electricity). The prior method consists of using some artificial neural networks for evaluating the availability of renewable energy potentials such as wind and solar energy on some selected sites. The work further evaluates the maximization of the throughput in the deployment of the femto-cells supported by a macro-cell. A numerical approach was used to find the optimal number of the femto-cells. Then the optimization of the air interface is studied from the drive testing data, in order to reduce the energy consumption due to the propagation models for the effective radiated power. Finally, the assets of supplying the communication sites from solar energy are performed by regions for the case study in Togo.*

**Index Terms :** artificial neural networks, a-prior optimization, energy efficiency, green communication, propagation models, renewable energy, spectral efficiency