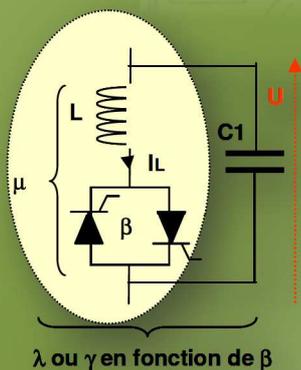
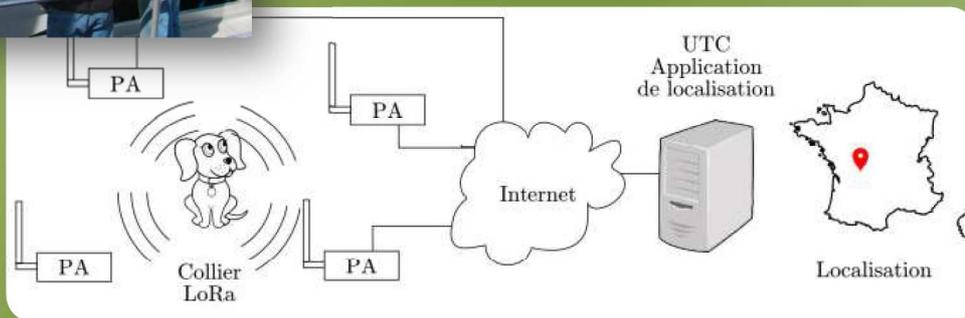
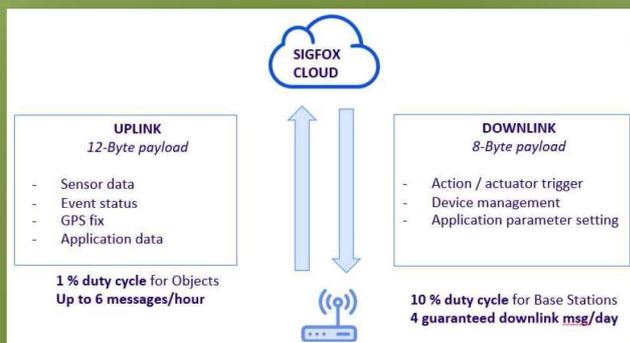


La Revue SEE



Ressource publiée sur Culture Sciences de l'Ingénieur : <https://eduscol.education.fr/sti/si-ens-paris-saclay>



Réseaux à faible consommation et longue portée

Publication trimestrielle du Cercle Thématique 13.01 de la SEE

ENSEIGNER L'ÉLECTROTECHNIQUE ET L'ÉLECTRONIQUE INDUSTRIELLE



Société de l'Électricité, de l'Électronique et des Technologies de l'Information et de la Communication



Club des Enseignants et des Chercheurs en
Electronique, Electrotechnique et Automatique
Electrical and Information Engineering

59e congrès du Club EEA

12 et 13 juin 2019

Rennes - PNRB (Campus Beaulieu)



Ce rendez-vous annuel sera l'occasion de discussions et d'échanges d'expériences pour les collègues enseignants /chercheurs, enseignants, et chercheurs issus de la communauté de l'EEA.

Le thème retenu de ce congrès est « **IOT et ville intelligente** ».

Les deux journées de ce congrès seront rythmées autour de 3 conférences-débats intitulées :

- « Maison intelligente »,
- « Véhicule autonome »
- « IOT santé »

et sera accompagné par des démonstrations de matériels pédagogiques et de recherche.

Ce congrès sera aussi l'occasion de discussions d'échanges d'expériences enrichissants pour les enseignants, enseignants/chercheurs, chercheurs et professionnels. Il permettra de favoriser l'avancement des méthodes et bonnes pratiques d'enseignement et de recherche dans les disciplines de l'EEA, créer de meilleures interactions entre recherche et enseignement, et milieu professionnel.

Plus d'information sur <https://clubeea2019.sciencesconf.org>



La Revue 3EI
publication trimestrielle
de la SEE

SOCIÉTÉ de l'ÉLECTRICITÉ, de l'ÉLECTRONIQUE et des TECHNOLOGIES de l'INFORMATION et de la COMMUNICATION.

17, rue de l'Amiral Hamelin, PARIS 75783 CEDEX 16
Tél : 01 56 90 37 09
site web : www.see.asso.fr

SEE, association reconnue d'utilité publique par le décret du 7 décembre 1886
Siret 785 393 232 00042, APE 9412 Z, n° d'identification FR 44 785 393 232

3EI : Enseigner l'Electrotechnique et l'Electronique Industrielle

<p>La Revue 3EI, Édition SEE, 17 rue de l'Amiral Hamelin 75783 PARIS Cedex 16</p> <p>Directeur de la publication François GERIN Président de la SEE</p> <p>Rédacteur en Chef Franck LE GALL</p> <p>Adresser les propositions d'article à : revue3ei@gmail.com ou sur le site https://www.see.asso.fr/3ei rubrique "soumettre un article"</p> <p>Communication M. Jacques HORVILLEUR communication@see.asso.fr 01 56 90 37 09</p> <p>Promotion et Abonnements (4 numéros par an) Janvier, Avril, Juillet, Octobre 2018. Tél : 01 56 90 37 09 abo@see.asso.fr</p> <p>tarifs TTC : (revue papier + num)</p> <p>Individuel : France et UE 42 € Pays hors UE 53 €</p> <p>Institutionnel : France et UE 60 € Pays hors UE 75 €</p> <p>Au numéro : France et UE 12 €</p> <p>Impression : JOUVE 53100 Mayenne 11 bd de Sébastopol - 75027 Paris Cédex 1 - Tel : 01 44 76 54 40 Couv : O.P. : All. - TFR : 0 - C. : PEFC Corp. : O.P. : Esp. - TFR : 0 - C. : PEFC</p> <p>Dépôt Légal : Avril 2018 Commission Paritaire 1222 G 78028 ISSN 1252-770X</p>	<p style="text-align: right;">Sommaire du n° 96</p> <p style="text-align: center;">Numéro spécial : Réseaux à faible consommation et longue portée</p> <p>p. 2 Éditorial,</p> <p>p. 3 Réseaux très basse consommation, longue portée, bas débit, l'exemple de LoRaWAN Anthony Juton ENS Paris Saclay</p> <p>p. 11 Réseaux longue portée, très basse consommation et bas débit. Application pédagogique, supervision de batteries Anthony Juton¹, Julien Warengem², Moez Ezzerelli², Fabien Guillard³, ¹. ENS Paris Saclay ². Polytech Paris-Sud ³. SNCF</p> <p>p. 16 Mise en œuvre des réseaux longue portée, très basse consommation et bas débit dans la supervision de la ville de Paris Anthony Juton¹, Corentin Presvots¹, Erwan Jacob², De Montalembert², ¹. ENS Paris Saclay ². Eiffage Energie Systèmes</p> <p>p. 22 Géolocalisation dans un réseau LoRaWAN Wafae Bakkali^{1,2}, Michel Kieffer¹, Massinissa Lalam² et Thierry Lestable² ¹ CNRS-CentraleSupélec-Université Paris-Sud ² Sagemcom., 92500 Rueil-Malmaison</p> <p>p. 29 Le réseau Sigfox et l'internet des objets (IoT) Aurélien Lequertier Sigfox, 112, avenue de Wagram 75017 Paris, France</p> <p style="text-align: right;">Hors Thème :</p> <p>p. 35 Perturbations engendrées sur les réseaux par les fours à arc alternatifs Jacques Courault</p> <p>p. 49 Détermination des modes de conduite des véhicules électriques dans des conditions réelles par des méthodes de classification Ben-Marzouk^{1,2}, Guy Clerc¹, Serge Pélissier², Ali Sari¹, Pascal Venet¹ ¹Univ Lyon, Université Claude Bernard Lyon 1, Ecole Centrale de Lyon, INSA Lyon, CNRS, Ampère, F-69622, Villeurbanne, France ²Université de Lyon, IFSTTAR, AME, LTE, 69500 Bron, France</p> <p>p. 55 Enjeu du Bio-Encrassement des Systèmes de Récupération des Energies Marines Renouvelables : Etat de l'Art sur les Impacts et sur la Prévention Hosna Titah-Benbouzid, Mohamed Benbouzid Université de Bretagne Occidentale, France</p> <p>p. 69 Stage CERPEP : L'éolien en LGT et LP Ai Lan Bui Van, Jean Meunier, Jean-Michel Gay, Jean-Philippe Ilary Lycée Jules FERRY - 78000 VERSAILLES</p>
--	--

Toute reproduction ou représentation intégrale ou partielle, par quelque procédé que ce soit, des pages publiées dans la présente édition, faite sans l'autorisation de l'éditeur est illicite et constitue une contrefaçon. Seules sont autorisées, d'une part, les reproductions strictement réservées à l'usage privé du copiste et non destinées à une utilisation collective et, d'autre part, les analyses et courtes citations justifiées par le caractère scientifique ou d'information de l'œuvre dans laquelle elles sont incorporées. Toutefois des copies peuvent être utilisées avec l'autorisation de l'éditeur. Celle-ci pourra être obtenue auprès du Centre Français du Droit de Copie, 20, rue des Grands Augustins, 75006 Paris, auquel la Revue 3EI a donné mandat pour la représenter auprès des utilisateurs. (loi du 11 mars 1957, art.40 et 41 et Code Pénal art. 425)

L'internet des objets pénètre peu à peu notre vie de tous les jours. Les mots clés de « big data », « intelligence artificielle », « Internet des Objets » (IOT) se retrouvent régulièrement dans l'espace médiatique. Des millions d'objets connectés par différents protocoles transmettent un nombre impressionnant de données, permettant d'optimiser le fonctionnement de systèmes complexes (circulation routière, équilibre production-consommation des réseaux électriques, suivi en temps réel des flottes de véhicules comme les vélos ou trottinettes en libre-service ...). Pour fixer un ordre de grandeur, on peut citer le cabinet Gartner qui prévoit 20 milliards d'objets connectés en 2020. Ce numéro de la revue 3EI va donc s'intéresser aux réseaux qui sous-tendent le développement de l'IOT et particulièrement les réseaux basse consommation, longue portée, en insistant sur les projets réalisables avec nos étudiants à différents niveaux de formation.

« Thème : Réseaux à faible consommation et longue portée »

L'introduction du thème nous est proposée par Anthony Juton de L'ENS Paris-Saclay. Après un panorama des différents réseaux utilisés pour collecter les données des objets connectés, il nous présente les caractéristiques des réseaux basse consommation, longue portée (LPWAN) et plus particulièrement celles du LoRaWAN.

M. Juton et des étudiants de Polytech Paris-Sud, nous exposent dans un second article un premier exemple d'application de l'apport du réseau LoRa pour l'optimisation d'un service proposé dans la gare SNCF de Rennes ; la gestion des batteries des rampes d'accès qui permettent d'installer des personnes en situation de handicap à bord des trains.

L'article suivant présente un projet de plus grande échelle puisque celui-ci vise à déployer des objets connectés (5500 à ce jour) sur les réseaux connectés basse consommation LoRa et Sigfox sur les bâtiments du parc municipal de la ville de Paris. En effet, la capitale française, très active en matière de climat, a lancé début 2016 dans le cadre de son Plan Climat Air Énergie un très grand projet de supervision énergétique des bâtiments. Le projet, qui se terminera en 2020, a pour objectif une diminution de 30% de la consommation énergétique du parc municipal.

Un des défis majeurs que doivent relever les développeurs de l'IOT concerne la géolocalisation. M. Bakali et son équipe présentent une approche exploitant un filtre de Kalman étendu, afin de géolocaliser des objets dans un réseau de type Low Range Wide Area Networks (LoRaWAN). Les résultats expérimentaux obtenus lors d'une campagne de mesure permettent d'évaluer la précision de localisation qu'il est possible d'atteindre dans ce type de réseau en employant une approche simple.

Pour supporter le développement de l'IOT, il faut disposer d'une solution de connectivité mondiale, économique et très peu consommatrice en énergie. Le dernier article du thème présente les très nombreuses applications offertes par l'utilisation de la technologie Sigfox pour l'optimisation des processus industriels et dans le développement économique, social et environnemental.

« Hors thème »

L'article de M. Courault fait suite à sa présentation des fours à arc publié dans le numéro 95 de la revue 3EI. Il s'intéresse aux perturbations engendrées par ces installations sur les réseaux électriques.

L'équipe lyonnaise représentée par M. Ben-Marzouk, nous présente les différentes techniques utilisées pour analyser et classer les données et les différents modes d'usages des véhicules électriques afin d'étudier le vieillissement de leurs batteries.

De nombreuses innovations permettent aujourd'hui d'extraire l'énergie des mers. Toutefois, le milieu marin est aussi et surtout un milieu biologique complexe et les organismes marins peuvent venir perturber les systèmes de récupération d'énergie. L'équipe de l'UBO de M. Benbouzid nous offre un état de l'art exhaustif sur ce domaine encore mal connu.

Pour terminer ce numéro déjà bien riche, les collègues du lycée Jules Ferry de Versailles nous exposent le contenu du stage CERPEP sur « l'éolien en LGT et LP », auquel les enseignants de l'éducation nationale peuvent s'inscrire.

Bonne lecture

Le Comité de Publication de la Revue 3EI

La Revue 3EI

Comité de publication

Morgan ALMANZA

Hamid BEN AHMED

Arnaud BRUGIER

Jacques COURAULT

Jean FAUCHER

Gilles FELD

Jean Michel GAY

Jean-Philippe ILARY

Anthony JUTON

Chérif LAROUCI

Marie-Michèle LE BIHAN

Franck LE GALL

Denis LABROUSSE

Pascal LOOS

Marc PETIT

Sylvain PIETRANICO

Oviglio SALA

Jean-François SERGENT

Jean-Claude VANNIER

Faites connaître notre revue
Vous en assurez la pérennité

Réseaux très basse consommation, longue portée, bas débit, l'exemple de LoRaWAN

Anthony JUTON

Professeur agrégé à l'ENS Paris Saclay,

Résumé: La médiatique valorisation des données (big data) par de nouvelles méthodes d'exploitation (techniques de l'intelligence artificielle, augmentation des capacités de calcul) pour l'aide à l'exploitation de grands réseaux, la maintenance prédictible ou les services a amplifié l'essor des objets connectés.

Quelques objets médiatiques mais à l'intérêt peu évident (la brosse à dent connectée ?) ne doivent pas masquer les millions d'objets connectés : la voiture qui informe le réseau de l'état du trafic (Waze), le compteur Linky qui permettra d'optimiser la répartition horaire de la consommation électrique, le vélo en libre service qui envoie sa position et sa disponibilité aux utilisateurs ou la sonde de température qui permet de surveiller à distance le bon fonctionnement d'un transformateur de distribution. Le cabinet Gartner prévoit 20 milliards d'objets connectés en 2020. Dans cet article qui ouvre le dossier « Réseaux très basse consommation, longue portée, bas débit », nous présentons les spécificités de ces réseaux en détaillant particulièrement le LoRaWAN.

1. Introduction

Plusieurs réseaux collectent les données des objets connectés, avec des caractéristiques coûts, portée, débit, consommation diverses :

- Les réseaux cellulaires 3G/4G proposent un débit important et une couverture nationale mais pour un prix élevé (de l'équipement, de l'infrastructure, des licences de fréquences) et une consommation d'énergie importante. Ces caractéristiques sont bien adaptées pour les smartphones ou les voitures par exemple.

- Le Wifi propose un débit très élevé localement avec une consommation élevée. Il concerne les ordinateurs et smartphone, rechargés quotidiennement.

- Le Bluetooth (notamment le bluetooth low energy), le Zigbee, le Zwave, Enocean sont des réseaux locaux faibles consommation, bas coût. On y trouve des objets autonomes en domotique, en gestion technique des bâtiments, des montres connectées, des capteurs de santé... ils sont connectés localement (quelques mètres) à un équipement propriétaire (box adsl, smartphone,...) :

Apparaît ainsi pour l'Internet des objets le besoin d'un quatrième type de réseau bas coût, basse consommation, avec une couverture nationale. Ces trois caractéristiques nous amène à un débit très faible. Certains utilisent alors l'expression « Internet des petites choses ». On regroupe les réseaux de ce type LPWAN : Low Power Wide Area Network.



Figure 1 : répartition des réseaux en fonction du débit et de la portée. Source [1]

La cible type visée par ces nouveaux réseaux apparus depuis 2009 est un réseau de capteurs aux caractéristiques suivantes :

- coût unitaire inférieur à 10 euros (dont une bonne part pour la pile/batterie),
- autonomie de 10 ans,
- 1 émission d'une dizaine d'octets de données chaque 12h,
- réseau opéré à couverture nationale,
- abonnement de 10 euros par an et par capteur.

Ce dossier comporte 5 articles :

- Le présent article présente les réseaux très basse consommation, longue portée et bas débit, en détaillant LoRaWAN,

- Le second article présente une application développée par des étudiants pour la supervision des batteries de la gare SNCF de Rennes via un réseau LoRaWAN local,

- Le troisième article présente le déploiement à grande échelle d'objets connectés via notamment un

réseau LoRa opéré par Objenious pour la supervision des bâtiments de la ville de Paris,

- Le quatrième article présente la technique de géolocalisation des objets via les passerelles du réseau LoRaWAN, développée par le laboratoire de l'université Paris Sud et Sagemcom,

- Enfin, le dernier article présente le réseau Sigfox.

2. Les réseaux LPWAN

LPWAN (Low Power Wide Area Network) est le sigle regroupant les réseaux basse consommation, longue portée. Comme nous l'avons dit dans l'introduction, l'enjeu pour le développement des objets connectés est :

- une très basse consommation permettant une autonomie de l'objet en énergie,

- un bas coût (objet, abonnement),
- un réseau à couverture nationale.

2.1. Réseau opéré, réseau local

Les réseaux d'objets connectés peuvent être locaux ou opérés. Bluetooth, Zigbee, Zwave, EnOcean sont des réseaux locaux. LoRaWAN que nous détaillerons plus loin permet également de créer des réseaux locaux.

Sur un réseau local, l'infrastructure appartient à l'entreprise exploitant les capteurs.

Sur un réseau opéré, l'infrastructure appartient à un opérateur. L'entreprise installe ses capteurs et les enregistre chez l'opérateur. L'entreprise paye ensuite un abonnement par capteur pour avoir accès à ses données collectées par l'opérateur.

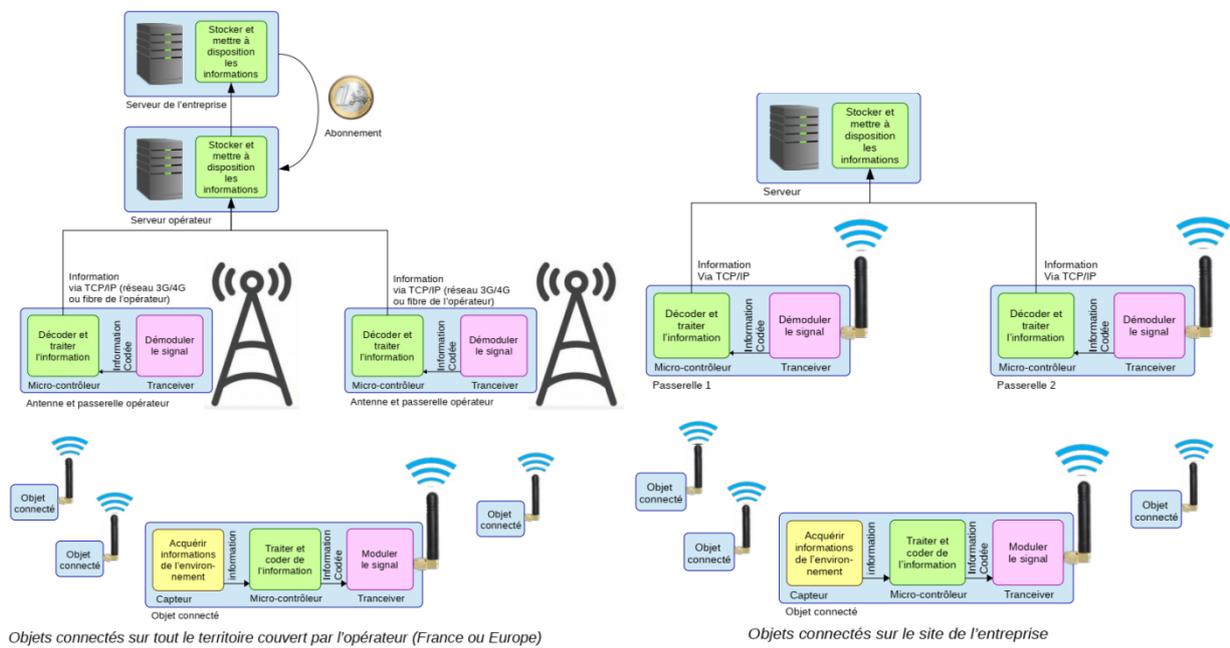


Figure 2

En France, on trouve 5 réseaux opérés ayant une couverture nationale, au moins en extérieur :

- Sigfox propose une couverture européenne,
- Objenious (filiale IoT de Bouygues Telecom) propose une couverture nationale en LoRaWAN,
- Orange propose 2 réseaux : LoRa et LTE-M
- SFR propose depuis peu un réseau NB-IoT.

On peut noter aussi l'apparition d'un réseau LoRaWAN international ouvert basé sur les passerelles de ses membres : TheThingNetwork. En France, quelques zones sont couvertes.

LoRa et Sigfox sont 2 technologies françaises implantées dans le monde. Sigfox est à la fois le nom du protocole et de l'opérateur. La société est née à Toulouse en 2009 et se répand dans le monde : Sigfox a récemment annoncé couvrir 1 milliard d'habitants.

La modulation LoRa est le résultat des recherches d'une équipe de Grenoble. Leur Startup Cycleo, née aussi en 2009, a depuis été rachetée par Semtech, une entreprise américaine qui assure la promotion de sa technologie auprès d'opérateurs potentiels. LTE-M et NB-IoT sont des technologies basse consommation utilisant les réseaux cellulaires 4G pour LTE et 2G/3G/4G pour NB-IoT.

2.2. Des réseaux à faible coût

Pour un bas coût d'usage, sont concernés à la fois l'objet connecté, l'infrastructure et son exploitation (essentiellement le paiement ou non d'une licence pour la bande de fréquence).

Au niveau de l'objet, cela implique très peu d'intelligence embarquée et des codages et modulations simples. Aujourd'hui un module complet LoRaWAN ou Sigfox, en grande quantité, est aux alentours de 5 euros auquel il faut ajouter le prix de la pile/batterie et du capteur.

Pour limiter le coût d'exploitation et d'infrastructure, plusieurs réseaux, dont LoRaWAN et Sigfox, utilisent les bande ISM (Industrie, Science, Médical) libres : 433 et 868 MHz en Europe et 915 MHz en Amérique du Nord (plusieurs bandes de fréquences similaires en Asie) pour 3 raisons :

- ces bandes de fréquences ne sont pas soumises à des licences comme celles des réseaux cellulaires,
- Les transmissions à ces fréquences ont une moindre atténuation, une meilleure pénétration des murs (sous-sols...) donc elles nécessitent l'installation de moins d'antennes et nécessitent moins d'énergie au niveau de l'émetteur,
- Elles sont moins occupées que la bande libre à 2,45 GHz (WiFi, bluetooth). Sur la bande 868 Mhz, il n'est autorisé pour un objet de n'émettre que 1% du temps au maximum.

Pour limiter le coût de l'infrastructure et de sa maintenance, il est nécessaire de réduire le nombre d'antennes. Sigfox et LoRa ont apporté des progrès significatifs dans les techniques de modulation (Ultra Narrow Band pour Sigfox et Chirp Spread Spectrum pour LoRa) pour augmenter la portée (le récepteur peut démoduler correctement un message arrivant avec -130 dBm d'amplitude). Ils annoncent 15 km de portée en champ libre, et 1 km en ville. NB-IoT et LTE-M utilisent le réseau cellulaire, donc des bandes de

fréquence au-delà du GHz pour lesquelles les opérateurs ont payé de chères licences. Au prix d'une mise à jour des antennes ces réseaux proposent une couverture nationale. Ces réseaux permettent un meilleur débit mais au prix d'une modulation plus complexe et plus gourmande en énergie.

2.3. Des réseaux longue portée

L'intérêt des technologies longue portée est non seulement de limiter le nombre d'antenne nécessaire mais aussi d'autoriser une émission depuis les zones enterrées. LoRaWAN comme Sigfox mettent en avant leur capacité à remonter des données depuis les sous-sols où se trouvent souvent les équipements techniques des bâtiments à superviser.

Pour atteindre ces longues portées tout en respectant les puissances d'émission autorisées, l'idée est de transmettre plus de puissance pour chaque bit de données. Le débit est donc limité. Nous verrons un peu plus en détail la technologie développée par LoRa dans le chapitre suivant. Un nœud Sigfox est limité par jour à l'émission de 140 trames de 12 octets et à la réception de 4 trames de 8 octets.

2.4. Des réseaux faible consommation

Pour diminuer leur consommation, les objets sont la majeure partie du temps en veille. Ils ne peuvent servir de relais pour un réseau maillé. Les réseaux utilisent donc une topologie en étoiles. Comme plusieurs antennes, connectées au même serveur réseau, sont disponibles le plus souvent, on parle de réseau multi-étoiles ou de réseau en étoile d'étoiles...

Les nœuds autonomes LoRaWAN et Sigfox ne se réveillent que ponctuellement pour émettre et à ce moment-là peuvent éventuellement recevoir. Cela implique un temps de latence important voir très important pour recevoir une instruction. C'est pour cela que l'on trouve essentiellement des capteurs sur ce type de réseau.

Le tableau suivant permet de comparer les principaux réseaux IoT du marché. NarrowBand désigne Sigfox, sans le nommer.

Feature	LoRaWAN	Narrow-Band	LTE Cat-1 2016 (Rel12)	LTE Cat-M 2018 (Rel13)	NB-LTE 2019(Rel13+)
Modulation	SS Chirp	UNB / GFSK/BPSK	OFDMA	OFDMA	OFDMA
Rx bandwidth	500 - 125 KHz	100 Hz	20 MHz	20 - 1.4 MHz	200 KHz
Data Rate	290bps - 50Kbps	100 bit/sec 12 / 8 bytes Max	10 Mbit/sec	200kbps - 1Mbps	~20K bit/sec
Max. # Msgs/day	Unlimited	UL: 140 msg/day	Unlimited	Unlimited	Unlimited
Max Output Power	20 dBm	20 dBm	23 - 46 dBm	23/30 dBm	20 dBm
Link Budget	154 dB	151 dB	130 dB+	146 dB	150 dB
Battery lifetime - 2000mAh	105 months	90 months		18 months	
Power Efficiency	Very High	Very High	Low	Medium	Med high
Interference immunity	Very high	Low	Medium	Medium	Low
Coexistence	Yes	No	Yes	Yes	No
Security	Yes	No	Yes	Yes	Yes
Mobility / localization	Yes	Limited mobility, No loc	Mobility	Mobility	Limited Mobility No Loc

Figure 3: Comparaison des principaux réseaux IoT : source [2]

On peut retenir que LoRaWAN et Sigfox sont optimaux pour une faible consommation, un faible coût

et en contrepartie un faible débit et un temps de latence à la réception important.

NB-IoT et LTE-M nécessitent des composants plus coûteux et plus gourmands mais le débit, le temps de latence à la réception et la qualité de service sont meilleurs. La sécurisation des données est réputée très bonne sur ces réseaux. La possibilité de géolocaliser l'objet qu'apporte LoRaWAN peut aussi être un critère de choix.

2.5. Applications

Objenious annonce 120 000 objets connectés sur son réseau, preuve que les réseaux LPWAN répondent à un besoin. On liste ici quelques applications :

- Veolia eau et Orange ont été dans les premiers à installer un réseau LPWAN (M2o city) en île de France pour la supervision de 500 000 compteurs d'eau. Aujourd'hui, Veolia et Orange annoncent le projet de relier 3 millions de compteurs au réseau LoRaWAN, sur toute la France.

- Les gestionnaires de grands réseaux (RTE, SNCF, Veolia, Suez, GRTGaz...) sont tous impliqués dans des projets mettant en œuvre les réseaux LPWAN pour la surveillance nationale de leurs installations,

- Les sociétés de ramassage d'ordures travaillent sur des conteneurs indiquant leur taux de remplissage.

- Dans le domaine de l'agriculture, les systèmes d'arrosage récupèrent des informations sur l'humidité des sols, Les badges RFID des bovins ont été remplacés par des badges LoRaWAN en Uruguay,

- Des animaux sauvages sont équipés d'une puce LoRaWAN en Afrique du Sud, de même pour des rhinocéros du Rwanda,

- Dans le domaine de la logistique, des palettes communicantes et localisées apparaissent,

- L'article sur la supervision des bâtiments de la ville de Paris apportent un exemple de l'intérêt des réseaux LPWAN pour les villes,

- Safecast (<http://safecast.org/tilemap>) est une entreprise agréant via des capteurs connectés des données de radioactivité dans le monde entier,

3. Le réseau LoRaWAN

Le réseau LoRaWAN, est portée par une association LoRa Alliance. Celle-ci affiche aujourd'hui 100 opérateurs réseau, dans 100 pays différents. Elle regroupe 500 membres : opérateurs (Orange et Objenious en France), fabricants de matériel (Sagemcom, ST Microelectronics, semtech...) et de logiciel (IBM, Google Cloud). Elle a la charge de

standardiser et de promouvoir le protocole et de certifier les produits.

Le protocole LoRaWAN comprend une couche physique (modulation, transmission) LoRa et une couche logicielle décrivant notamment l'accès au réseau et les encryptions

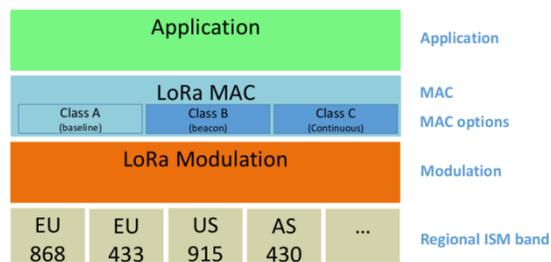


Figure 4 : Couches réseaux du protocole LoRaWAN, source [3]

3.1. La modulation LoRa

Le succès de LoRaWAN repose essentiellement sur la modulation LoRa qui permet une démodulation correcte dans des conditions de rapport signal/bruit très mauvaises. Cette qualité permet une longue portée, y compris à travers les murs et plancher.

Elle utilise les bandes de fréquence ISM autour de 868 MHz et 433 MHz.

Modulation	Bandwidth [kHz]	Channel Frequency [MHz]	FSK Bitrate or LoRa DR / Bitrate	Nb Channels	Duty cycle
LoRa	125	868.10 868.30 868.50	DR0 to DR5 / 0.3-5 kbps	3	<1%

Figure 5: Les 3 canaux LoRa dans la bande ISM 868 MHz. Source [5]

Cette modulation nommée Chirp Spread Spectrum consiste à moduler les bits par des chirp. Un chirp est un signal dont la fréquence augmente de manière continue.

La modulation par saut de fréquence (FSK), très utilisée, consiste à envoyer une fréquence pour le 1 et une autre pour le 0.

Pour LoRa, ce sont des chirp que l'on envoie. Le chirp ne commence pas forcément à la fréquence basse flow. La valeur de l'ensemble de bits (de 7 à 12 bits sont codés par symbole) réside alors dans l'instant du saut de fréquence dans la période allouée au chirp. Cette période est aussi appelée symbole.

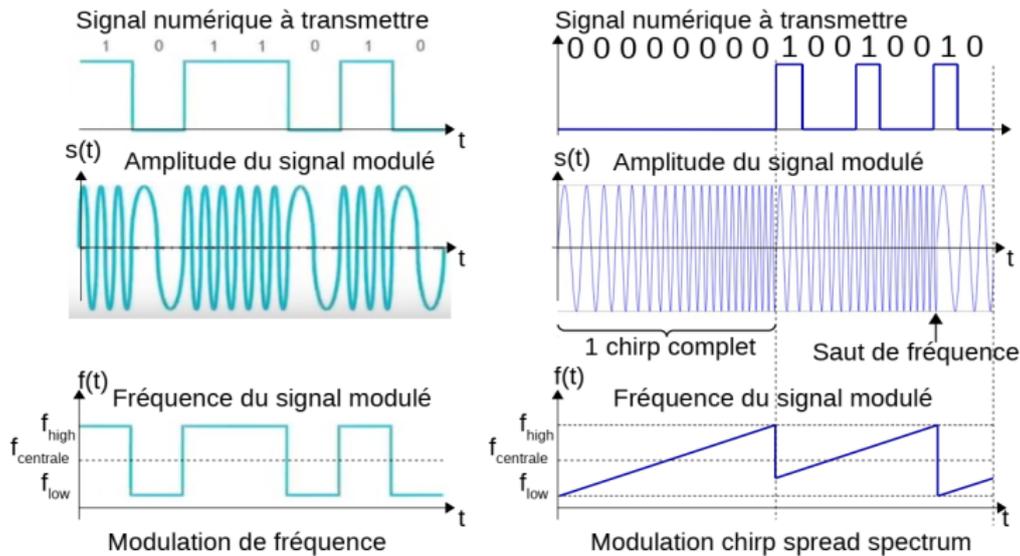


Figure 6: Principe de la modulation chirp spread spectrum

Une trame LoRa a l'évolution de sa fréquence du type de celle représentée ci-dessous. :

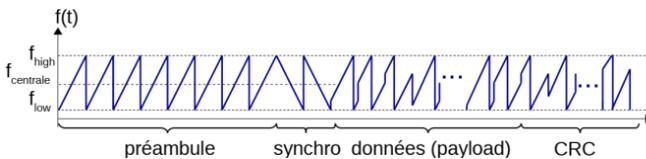


Figure 7 : Evolution temporelle de la fréquence d'une émission LoRa

Durant le préambule 8 chirps allant de la fréquence basse à la fréquence haute se succèdent, suivis du champ de synchronisation : 2 chirps allant de la fréquence haute à la fréquence basse. Ces deux champs permettent à tout récepteur LoRa de distinguer un début de trame et de se synchroniser dessus.

Ensuite, suivent les données et le CRC (code de détection d'erreur) avec des chirps ne commençant pas à la fréquence basse.

Plus le chirp met longtemps pour passer de la fréquence basse à la fréquence haute, plus la

démodulation sera aisée et la transmission robuste. Par contre, l'émission d'une trame demandera plus de temps. C'est pourquoi, pour avoir des trames de longueur raisonnable, le nombre de bits est réduit pour les débits les plus faibles (59 octets de données pour SF12 et 250 pour SF7).

LoRaWAN propose 7 débits LoRa allant de 250 bits/s à 11 kbps, en fonction de l'étalement de spectre (spreading factor) et un débit de 50 kbps en FSK.

DataRate	Configuration	Indicative physical bit rate [bit/s]
0	LoRa: SF12 / 125 kHz	250
1	LoRa: SF11 / 125 kHz	440
2	LoRa: SF10 / 125 kHz	980
3	LoRa: SF9 / 125 kHz	1760
4	LoRa: SF8 / 125 kHz	3125
5	LoRa: SF7 / 125 kHz	5470
6	LoRa: SF7 / 250 kHz	11000
7	FSK: 50 kbps	50000
8..14	RFU	
15	Defined in LoRaWAN ¹	

Figure 8 : débits LoRaWAN possibles en Europe.
Source [5]

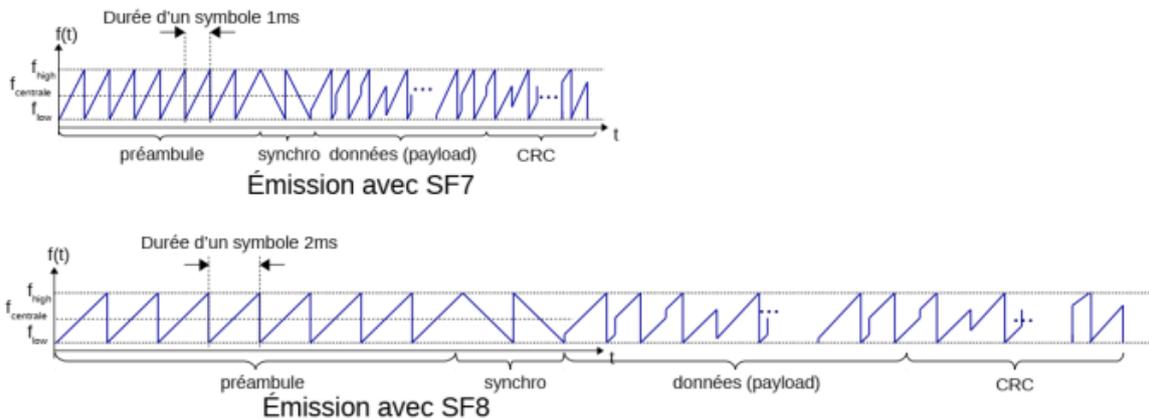


Figure 9 : Effet du changement de facteur d'étalement

Pour SF7, un symbole (une période pendant laquelle un chirp entier est envoyé) dure 1 ms, on y code 7 bits. Une trame de 10 octets est composée de :

- 8 périodes de préambule + 2 périodes de synchro
- $(1 \times 8 \text{ bits d'en-tête} + 10 \times 8 \text{ bits de données} + 4 \times 8 \text{ bits de code d'intégrité} + 4 \times 8 \text{ bits de CRC}) / 7 \text{ périodes} = 21,7 \text{ périodes}$.

Elle dure donc environ 32 ms.

Pour SF12, une période dure 32 ms. On y envoie 12 bits. Une trame de 10 octets est composée de :

- 8 périodes de préambule + 2 périodes de synchro
- $(1 \times 8 \text{ bits d'en-tête} + 10 \times 8 \text{ bits de données} + 4 \times 8 \text{ bits de code d'intégrité} + 4 \times 8 \text{ bits de CRC}) / 12 \text{ périodes} = 12,7 \text{ périodes}$

Elle dure donc environ 704 ms.

Plus le débit est important, moins l'objet émet longtemps pour un même paquet de données. Il est donc plus économe en énergie d'utiliser un facteur d'étalement faible si la réception le permet.

Notons qu'il est possible de démoduler 2 messages transmis en même temps s'ils n'utilisent pas le même facteur d'étalement. On dit que les messages sont orthogonaux. Un objet dispose donc de 3 degrés de liberté pour émettre un message :

- l'instant d'émission,
- le canal (1 des 3 canaux 868 MHz ou un des 3 canaux 433 MHz),
- le facteur d'étalement.

Si deux objets émettent avec une même valeur pour ces 3 degrés de liberté, il y a collision et les messages ne sont pas démodulables. Des techniques existent pour limiter les collisions mais leur complexité va à l'encontre du choix fait d'optimiser le coût et la consommation de l'objet. De plus, sur la bande 868 MHz peuvent communiquer des objets appartenant à d'autres réseaux LoRa. C'est pourquoi le mode d'émission, nommé Aloha, est très simple : un nœud émet quand il le souhaite et si son message entre en

collision avec un autre, il le réémet après un temps aléatoire.

3.2. Adaptive Data Rate

Pour les objets immobiles, il est possible d'adapter le facteur d'étalement automatiquement pour une communication robuste avec la consommation la plus faible possible.

L'objet envoie un message aux différentes passerelles. Le serveur réseau reçoit alors les messages reçus par les différentes passerelles avec la puissance de réception et le rapport signal / bruit. Il sélectionne alors le facteur d'étalement optimal et envoie cette information à l'objet connecté. Ce protocole s'appelle ADR pour adaptative Data Rate.

3.3. Réception (Downlink)

Les messages vont le plus souvent de l'objet vers le serveur (uplink). LoRaWAN autorise aussi les réceptions de message venant du serveur. Cela permet notamment au serveur d'envoyer :

- Le facteur d'étalement optimal,
- un acquittement des messages si demandé,
- une mise à jour du firmware de l'objet.

Le serveur choisit pour émettre la passerelle disponible (qui n'est pas en train d'émettre ou qui n'a pas utilisé tout son temps d'accès au réseau) qui reçoit les messages de l'objet concerné avec la meilleure qualité (SNR et RSSI).

Recevoir un message pose problème pour un objet cherchant à économiser au maximum son énergie. Pour recevoir, l'objet doit être à l'écoute du réseau et ne peut donc être en veille. LoRaWAN propose 3 types de classe pour les objets en fonction de leur aptitude à recevoir des messages :

- Tous les équipements connectés sur le réseau LoRaWAN doivent respecter la **classe A** : après chaque émission, l'objet écoute pendant 2 périodes successives. Le serveur peut profiter de ces 2 périodes pour envoyer un message à l'objet.

3.5. Géolocalisation

Le serveur réseau reçoit les messages horodatés reçus par chaque passerelle. A partir de ces informations liées à la distance entre l'objet et chaque passerelle, il peut proposer une géolocalisation de l'objet. Objenious annonce une précision de 100m. C'est l'objet de l'un des autres articles de ce dossier.

3.6. Sécurité

Le protocole LoRaWAN a été conçu très récemment, en toute conscience des risques de cybersécurité qu'apportent les objets connectés. Le protocole avance la sécurisation de son réseau comme un argument de choix.

Le protocole décrit le cryptage AES_128 des messages envoyés par les objets. L'information acquise sur le capteur est cryptée par 2 clés (une clé réseau et une clé application) par le microcontrôleur de l'objet. Ce message (payload) crypté est alors envoyé à la passerelle via la modulation LoRa.

La passerelle démodule la trame reçue et envoie le message, toujours crypté au serveur réseau. Le serveur décrypte avec la clé réseau l'en-tête du message pour s'assurer de la provenance du message. Il envoie alors les données au serveur application.

Le serveur application décrypte les données à l'aide de la clé application.

4. Conclusion

Les réseaux longue portée et très basse consommation, comme LoRaWAN, apportent de nouvelles possibilités en terme de coût de connexion des capteurs. Ils continuent leur extension pour améliorer la couverture du territoire national et des accords de roaming se mettent en place avec les opérateurs européens. Des entreprises ont déjà saisi cette opportunité pour des déploiements de capteurs à grande échelle.

Les recherches et développement portent sur l'amélioration de la géolocalisation et sur le changement d'échelle du réseau. L'arrivée massive d'objets connectés prévue sur ces réseaux utilisant tous les mêmes bandes de fréquences (433, 868 MHz ou 2,45 GHz) amènent des craintes quant à la pérennité de ces solutions.

5. Biographie

[1] LoRaWan Academy Ensemble de cours complet proposé par Semtech et TheThingNetwork. Une certification est possible en fin de parcours.

<https://course.lorawanacademy.com/>

[2] What is LoraWan ? Document disponible sur le site Lora-alliance

<https://lora-alliance.org/sites/default/files/2018-04/what-is-lorawan.pdf>

[3] LoRaWAN™ 1.1 Specification, disponible sur https://lora-alliance.org/sites/default/files/2018-04/lorawantm_specification_v1.1.1.pdf

[4] LoRa Chirp, une présentation pédagogique de la modulation LoRa par Richar Wenner <https://www.youtube.com/watch?v=dxYY097QNs0>

[5] LoRaWAN 1.1 Regional Parameters https://lora-alliance.org/sites/default/files/2018-04/lorawantm_regional_parameters_v1.1rb_-_final.pdf

[5] NB-IoT vs LoRa Technology, http://tracknet.io/docs/LoRa-Alliance-Whitepaper_NBIoT_vs_LoRa.pdf

[6] Low Power Wide Area Networks: An Overview, Usman Raza, Parag Kulkarni, and Mahesh Sooriyabandara, <http://home.deib.polimi.it/cesana/teaching/IoT/2017/papers/connectivity/LPWANSurvey.pdf>

[7] LoRaWAN™ Backend Interfaces 1.0 Specification <https://lora-alliance.org/sites/default/files/2018-04/lorawantm-backend-interfaces-v1.0.pdf>

RESEAUX LONGUE PORTEE, TRES BASSE CONSOMMATION ET BAS DEBIT APPLICATION PEDAGOGIQUE, SUPERVISION DE BATTERIES

ANTHONY JUTON¹, JULIEN WARENGHEM², MOEZ EZZERELLI², FABIEN GUILLARD³

¹ Professeur agrégé à l'ENS Paris Saclay,

² ingénieur Polytech Paris-Sud

³ technicien SNCF à la gare de Rennes

Résumé : Cet article présente un exemple d'application LoRa développée par des étudiants de Polytech Paris-Sud, sur un cahier des charges de la SNCF.

Mots clés : ville de Paris, supervision énergétique, objets connectés, IoT, LaRa, Sigfox

Dans la gare SNCF de Rennes, le service d'accueil des personnes à mobilité réduite utilise quotidiennement des rampes d'accès PSH (Guldmann LP11) qui permettent d'installer des personnes en situation de handicap à bord des trains. Les rampes fonctionnent sur batterie et sont stockées sur les quais, sans possibilité de charge des batteries. Un technicien rapporte donc chaque semaine les batteries sur le lieu de charge le soir pour les replacer dans les rampes le matin (le long des 3km cumulés de quais).

Pour optimiser l'utilisation des rampes, plusieurs critères sont à optimiser : le temps de maintenance, le taux de charge et la durée de vie des batteries.



Figure 1 : Rampe d'accès PSH Guldmann LP11

Début 2017, Fabien Guillard fait appel à l'IUT de Cachan / Polytech Paris-Sud pour développer une solution LoRa (la gare de Rennes ayant son propre réseau LoRa) qui permette de mesurer à distance le taux de charge des batteries. Julien Warenghem et Moez Ezzerelli, étudiants en école d'ingénieur à Polytech Paris-Sud ont travaillé sur ce cahier des charges pendant 1 an pour développer une preuve de faisabilité (POC, Proof of Concept).

La solution développée par ces étudiants, après analyse et développement par le service IoT de la SNCF, est en cours de développement et devrait passer en phase d'intégration. L'objectif à terme est de nationaliser le projet.

1. Description fonctionnelle du système

L'objectif est de concevoir un système de supervision de batteries (2 batteries 12V / 7,2 Ah) pour des rampes d'accès pour personnes à mobilité réduite au sein d'une gare pour :

- assurer le service d'accueil d'avoir une batterie chargée pour chaque rampe,
- diminuer le nombre de charges des batteries (et donc la charge des techniciens) en ne chargeant que les batteries ayant un niveau de charge inférieur à 70 %,
- augmenter la durée de vie des batteries en limitant le nombre de cycle de charge.

On trouve donc 2 fonctions principales :

- Déterminer le niveau de charge (SOC, State of Charge) et l'état de vétusté (SOH, State of Health) de la batterie,
- Superviser de manière centralisée ce niveau de charge.

Une fonction de localisation de la batterie, un temps évoqué, a été rapidement abandonnée, le réseau LoRa n'offrant pas une précision suffisante, d'autant plus en intérieur, pour connaître sur quel quai est une batterie. Chaque batterie sera donc affectée à une rampe précise.

Le nombre de batteries de rampe étant important (14 rampes à la gare de Rennes), la partie matérielle installée sur la batterie doit coûter quelques dizaines d'euros maximum, en lien avec le service qu'il apporte. Le réseau LoRa existant à la gare de Rennes, le reste des coûts est du développement matériel et logiciel, pour lequel la SNCF investit dans son effort de profiter des objets connectés pour améliorer gares et infrastructures.

Le système ne doit pas participer significativement à vider la batterie. Les batteries étant chargées au moins une fois par mois, une consommation moyenne inférieure à 24 mW est visée (autonomie théorique de 10 mois du système sur une batterie inutilisée).

Le système de mesure et de transmission ne doit pas être intrusif, pour ne pas menacer la garantie du matériel.

2. Le système de mesure embarqué

Le système de mesure et de transmission de l'état de la batterie doit être placé dans le boîtier plastique regroupant les 2 batteries 12V et la connectique.

2.1. Architecture fonctionnelle du système

L'état de charge (State of Charge SOC) de la batterie s'obtient par une mesure de la tension à vide, via un pont diviseur de tension de grande valeur.

L'état de vieillissement (State of Health SOH) de la batterie s'obtient par un essai en charge qui permet de déduire la résistance interne de la batterie. Une décharge à 1 A, (dans une résistance de 20 ohms) pendant 10 ms est choisie pour cet essai.

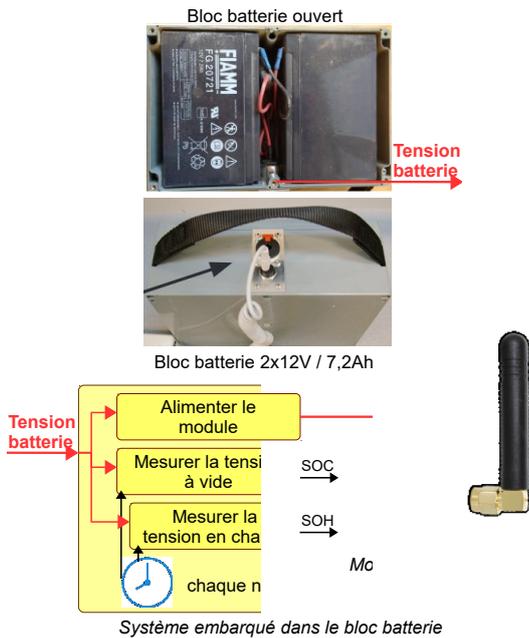


Figure 2 : Architecture fonctionnelle retenue pour le système de mesure embarqué dans le bloc batterie

2.2. Réalisation du système de mesure embarqué

Le pont diviseur de tension utilise des résistances de 47 et 7 kilohms, de sorte de limiter le courant à 500 μ A. On aurait pu envisager, comme pour la résistance de charge de déconnecter ce pont diviseur, hors mesure.

La mesure de la tension en charge de la batterie se fait en fermant 10 ms un transistor NMOS connectant la batterie à une résistance de 20 ohms. La consommation est alors proche de 1 A, pendant 10 ms, une fois par jour, soit une moyenne de 0,12 μ A.

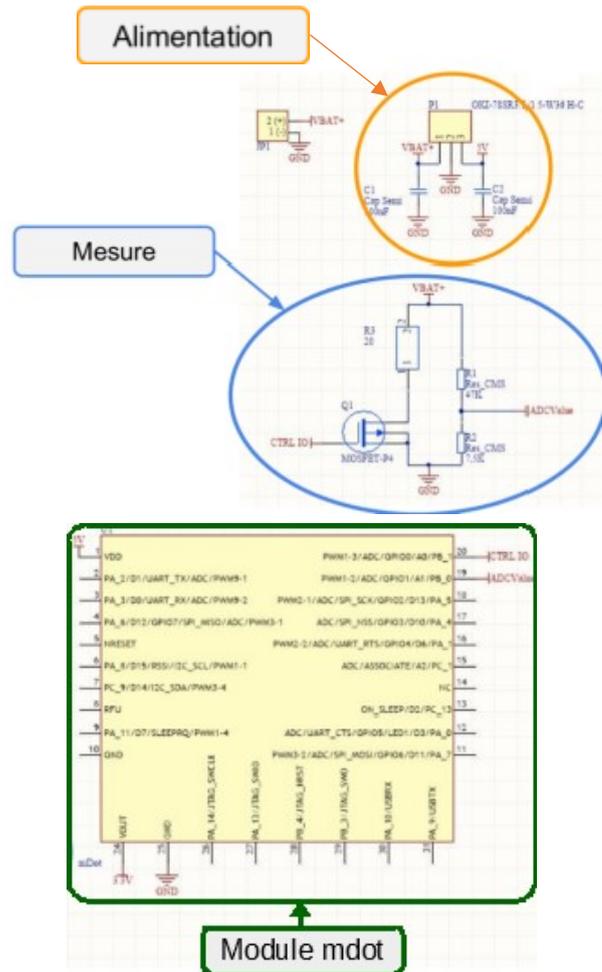


Figure 3 : Schéma électrique du système de mesure embarqué

Le module Multitech mdt est composé d'un microcontrôleur STM32F411 et d'un transceiver 868 MHz Semtech SX1272. Le module annonce une consommation en veille inférieure à 50 μ A mais 200 mA en transmission.

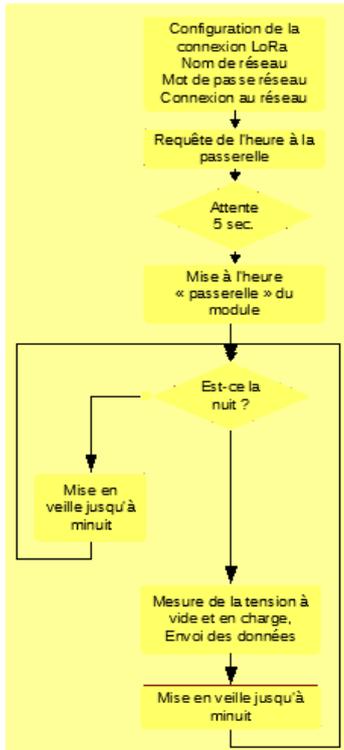
Un travail resterait à faire sur la conversion 24V \rightarrow 5V, le régulateur à découpage choisi ayant une consommation certaine (5 mA) à vide.



Figure 4 : Module LoRa Multitech mdt

2.3. Programmation du module mdot

Le module mdot dispose de la possibilité de passer en mode sleep (consommation annoncée 40 μ A) avec un réveil sur minuterie. On fait en sorte que le module se réveille à minuit, fasse ses deux mesures SOC et SOH et envoie les valeurs au serveur, avant de se mettre en veille de nouveau jusqu'à minuit.



```

static std::string network_name = "MTCOT-87654321";
static std::string network_passphrase = "12345678";
...
update_ota_config_name_phrase(network_name, network_passphrase,
join_network();

send_data(tx_request_time);

wait(5);

ret = dot->recv(rx_recv_time);

if ((current_hour >= 0) && (current_hour <= 3)) {
// IF YES : GO TO COMPUTE
actual_state = state_compute;
} else {
// IF NO : GO TO SLEEP
actual_state = state_sleep;
hours2midnight = 24-current_hour;
sleep_duration_s = hours2midnight*3600; // wake up
}
// GO TO SLEEP
dot->sleep(sleep_duration_s, mDot::RTC_ALARM, false);

float soc;
soc = getSOC();
float soh;
soh = getSOH();
// SEND SOC AND SOH TO GATEWAY

// GO TO SLEEP
actual_state = state_sleep;
  
```

Figure 5 : Algorithme du programme du mdot avec quelques extraits de code

3. La chaîne d'acquisition et de diffusion de l'information

3.1. Architecture retenue pour le système d'acquisition

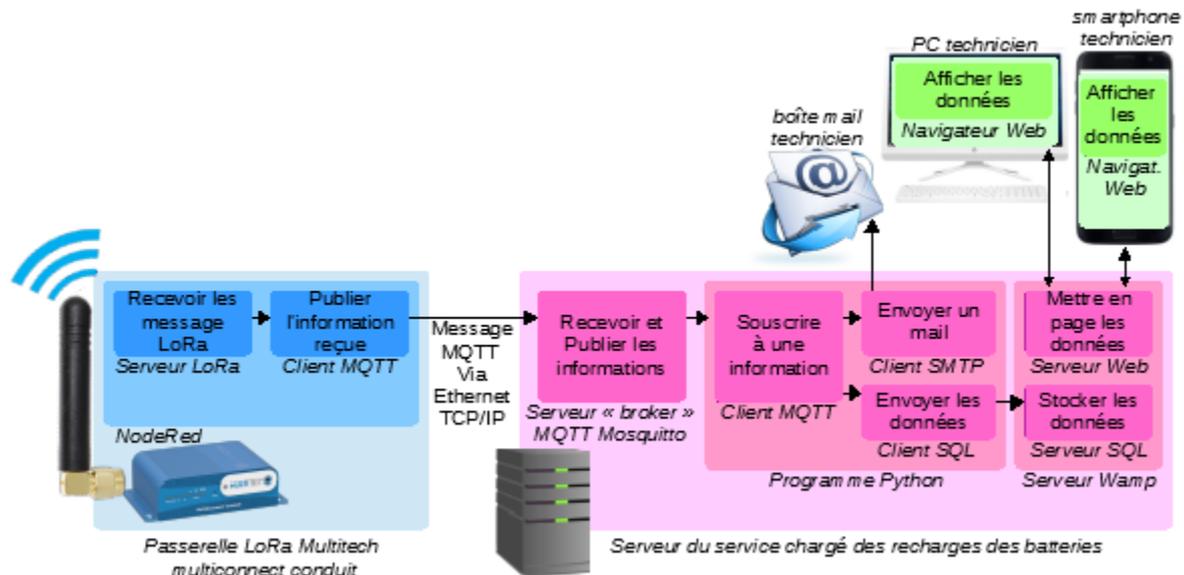


Figure 6 : Architecture fonctionnelle retenue pour la chaîne d'acquisition des données

Plutôt que de créer un serveur LoRa, tâche ambitieuse pour les novices en LoRa que nous étions, il est choisi d'utiliser une passerelle Multitech Multiconnect conduit (qui fait à la fois passerelle et serveur réseau LoRa). Celle-ci, configurable depuis son serveur web, permet assez aisément de mettre en place la réception des messages LoRa et l'émission d'informations via des messages MQTT, protocole conçu pour les transmissions issues d'objets connectés.

Un serveur MQTT est installé sur un PC, représentant le serveur du service chargé des batteries. Un programme python récupère les informations en MQTT, envoie un mail une fois par jour au technicien pour indiquer les batteries à charger et remplit une base de données MySQL historisant les informations des batteries. Un serveur web donne accès aux données de cette base.

3.2. Configuration / programmation de la passerelle

La passerelle Multitech Multiconnect Conduit dispose d'un serveur web embarqué pour sa configuration.



Figure 7 : Passerelle Multitech



Figure 8 : Kit de démarrage Multitech : 1 passerelle Conduit + 2 modules m-dot

On y trouve la configuration du réseau LoRa et un logiciel Node-Red permettant de programmer de manière graphique le comportement du serveur LoRa.

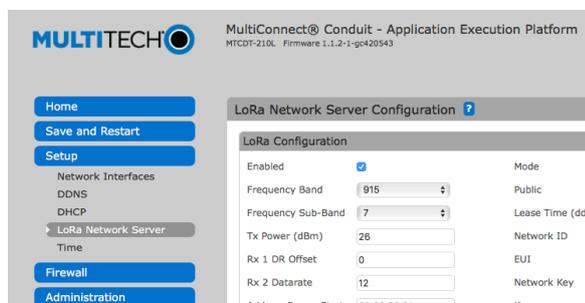


Figure 9 : Ecran de configuration du réseau LoRa de la passerelle Multitech

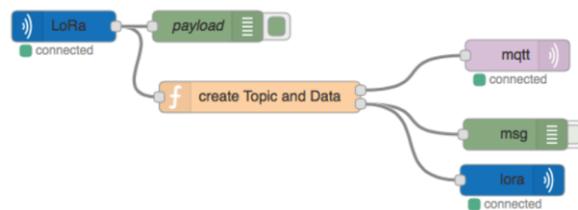


Figure 10 : Schéma du programme Node-Red implémenté dans la passerelle Multitech

Le schéma ci-dessus indique que lorsqu'une trame est reçue, son contenu (payload) est affiché localement dans la fenêtre de debug d'une part. D'autre part, son contenu est traité par la fonction « Create Topic and Data » :

```
// If time is detected send time through string
if(msg.payload == "time"){
  //console.log(datejour);
  //msg.payload = { payload : Date.now().toString() };
  msg.payload = Date.now().toString();
  msg.ack = false;
  return [,msg]
}else{
  var topic2 = "device/"+msg.eui;
  var newmsg = { topic: topic2, payload : msg.payload };
  return [newmsg,]
}
```

Figure 11 : code de la fonction Create Topic And Data

Si le message LoRa reçu par la passerelle est « time », la passerelle renvoie la date et l'heure au module demandeur. Sinon, la passerelle prépare un message MQTT avec le contenu du message LoRa reçu.

3.3. Le broker MQTT sur le serveur

MQTT est un protocole application de TCP/IP, populaire dans les communications liées aux objets connectés. Très léger, il est peu gourmand en énergie et en bande passante, mais il permet tout de même un fonctionnement sécurisé.

Il fonctionne sur le mode souscription / publication. Les clients (notre passerelle Multitech et notre programme Python) souscrivent à un même sujet / topic « device/ » suivi de l'identifiant du module m-dot.

- Quand la passerelle envoie un message au serveur/broker MQTT, ce dernier conserve le message jusqu'à ce qu'un nouveau message avec ce même sujet / topic arrive.
- Quand le programme Python demande au serveur / broker MQTT si des nouvelles sont arrivées sur les topics auxquels il a souscrit, on lui répond avec la nouvelle valeur arrivée.

Un serveur (appelé « broker ») mosquitto (serveur MQTT open source) est installé sur la machine. Il reçoit les messages MQTT envoyés par la passerelle Multitech via le réseau Ethernet TCP/IP.

3.4. Le programme Python sur le serveur

Le programme est écrit en Python, pour sa portabilité et pour la richesse des bibliothèques disponibles : Client MQTT, Client SQL, Client SMTP.

On crée un client MQTT abonné au topic "device/#" le "#" indique n'importe quelle donnée se trouvant à la suite de "device/"

```
##### DEFINE
#MQTT
TOPIC = 'device/#'
BROKER = "localhost"
PORTMQTT = 1883
```

Ainsi on récupère la totalité des modules de mesure de tension. Le client MQTT boucle en continu par la suite et si une déconnexion à lieu il tente de se reconnecter.

```
##### MQTT
#Create an MQTT Client
client = mqtt.Client()

#Connect to the on_connect fonction as a callback
client.on_connect = on_connect

#Connect to the on_message fonction as a callback
client.on_message = on_message

# define the connection server
client.connect(BROKER, PORTMQTT, 60)

# infinite Loop
client.loop_forever(timeout=1.0, max_packets=1, retry_first_connection=False)
#client.loop_start()
```

On associe la fonction callback "on_message", qui lors de la réception d'un message se déclenche. Cette fonction récupère les informations du message.

```
# The callback for when a PUBLISH message is received from the server.
def on_message(client, userdata, msg):
    capteur_name = msg.topic.split("/",2);
    #print(capteur_name[1])
    if int(msg.payload) < 70 :
        envoi_mail(msg, capteur_name[1])

sql = "INSERT INTO data_capteur (ID, nomcapteur, valeur, date) VALUES (NULL, %s, %s, CURRENT_TIMESTAMP)"

with conn.cursor() as cursor:
    cursor.execute(sql,(capteur_name[1],msg.payload))
    conn.commit()

print(msg.topic+" "+str(msg.payload))
```

Puis celle-ci enregistre les messages entrants dans la base de données SQL en fonction du capteur et de sa donnée (la date et l'index sont automatiquement mis à jour lors de la réception de nouvelles informations dans la base de données).

Dans la fonction "on_message", on ajoute une fonction "envoi_mail" qui si la donnée de niveau de batterie est inférieure à 70 %, envoie un mail à une ou plusieurs personnes pour leur signaler le niveau de tension ainsi que le nom de la batterie à recharger.

```
#Mail
def envoi_mail(msg, name):
    server = smtplib.SMTP('smtp.gmail.com', 587)
    server.starttls()
    server.login("julien.warenghem@gmail.com", "Chaussette91")
    val = "Battery " + name + " under 70% (level = " + msg.payload + " %)."

```

3.5. Le serveur Wamp (serveur SQL et serveur Web)

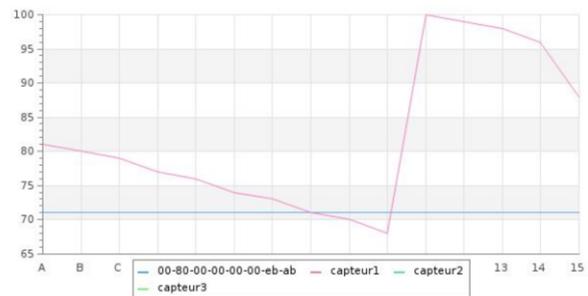
Le serveur Wamp est bien connu des éditeurs de site web. Il dispose d'une base de données MySQL et d'un compilateur PHP permettant de faire des pages web dynamique.

Une base de données MySQL est donc créée pour stocker les données des différents capteurs.

Pour afficher les données, l'outil PHP "JpGraph" permet de concevoir des graphiques rapidement.

Sensor Name	Battery Level	Last Update
00-80-00-00-00-00-eb-ab	71%	2018-05-18 10:48:07
capteur1	88%	2018-05-15 18:02:31
capteur2	96%	2017-11-27 15:32:00
capteur3	89%	2017-11-09 15:32:00

Filled Y-grid



4. Conclusion

A travers ce projet basé sur un cahier des charges concret, les étudiants ont pu démontrer la faisabilité d'une solution d'acquisition utilisant un réseau LoRa.

Ils ont su mettre en service un réseau local LoRaWan à partir d'une passerelle et de modules Multitech. Ils ont exploité le protocole MQTT pour transmettre les messages sur le réseau TCP/IP et ont stocké les informations dans une base de données.

Un peu juste en temps, ils n'ont pas pu tester la portée annoncée du module (2 km en champ libre), ils n'ont pas mesuré la consommation effective en mode veille et n'ont pu faire de statistiques sur la disponibilité du réseau.

Une fois intégré, le système si il devient national permettra à la SNCF, en plus d'améliorer la charge de ses batteries, de mettre en place un suivi et une analyse d'une grande quantité de données batterie. On peut espérer ainsi optimiser le cycle de vie de l'ensemble des batteries, peut-être prévoir les remplacements, mesurer quantitativement les effets du stockage à l'extérieur, comparer des marques de batteries sur le long terme...

MISE EN ŒUVRE DES RESEAUX LONGUE PORTEE, TRES BASSE CONSOMMATION ET BAS DEBIT DANS LA SUPERVISION DE LA VILLE DE PARIS

ANTHONY JUTON¹, CORENTIN PRESVOTS², ERWAN JACOB³, OLIVIER DE MONTALEMBERT⁴

¹ Professeur agrégé à l'ENS Paris Saclay,

² Elève de l'ENS Paris Saclay en Master 2 FESup,

³ Responsable Supervision Eiffage Energie Systèmes Ile de France - Informatique & Systèmes,

⁴ Chef de projet IoT/Smart Cities Eiffage Energie Systèmes – Forclum Numérique

Résumé : La ville de Paris, très active en matière de climat, a lancé début 2016 dans le cadre de son Plan Climat Air Énergie un très grand projet de supervision énergétique des bâtiments. Le projet qui se terminera en 2020 a pour objectif une diminution de 30% des consommations énergétiques du parc municipal.

Pour arriver à cet objectif à un coût raisonnable, ce projet est l'un des premiers à déployer à grande échelle des objets connectés (5500 à ce jour) sur les réseaux connectés basse consommation LoRa et Sigfox.

Mots clés : ville de Paris, supervision énergétique, objets connectés, IoT, LoRa, Sigfox

1. Présentation du projet

1.1. Les enjeux du projet

70 GWh/an sont consommés dans les 3600 établissements publics parisiens (écoles, crèches, piscines, ...), soit un coût de 30 millions d'euros par an

15 millions d'euros d'investissement ont été alloués à la rénovation d'équipements thermiques et d'équipements de contrôle-commande et à la mise en place de la supervision centralisée, pour 400 sites d'abord.

Deux millions d'euros d'économie annuelle sur la

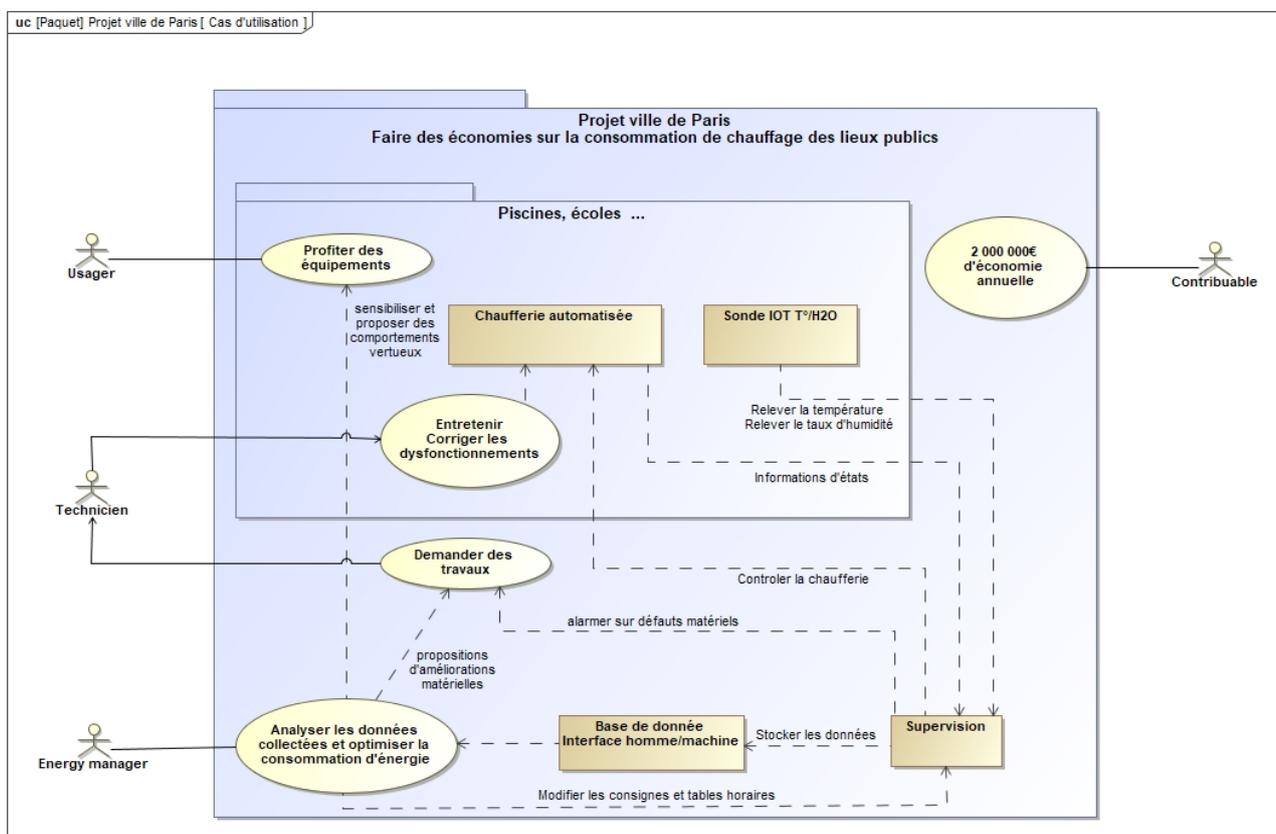


Figure 1 : Représentation graphique des fonctions du projet

pour le chauffage.

facture énergétique sont espérés.

Les fonctions de cette supervision sont :

- Envoyer des consignes (températures, plages horaires de fonctionnement) de manière centralisée aux différents sites,
- Remonter les alarmes défauts de chaque équipement,
- Optimiser la diffusion d'information, pour pouvoir agir plus rapidement (envoi de notifications, application mobile),
- Produire des données dont l'analyse permettra de détecter les anomalies et d'optimiser les consommations en ajustant les consignes et en promouvant des comportements vertueux.

Notons que, améliorer la maintenance des équipements énergétiques, en plus de générer des économies, améliore le confort des usagers.

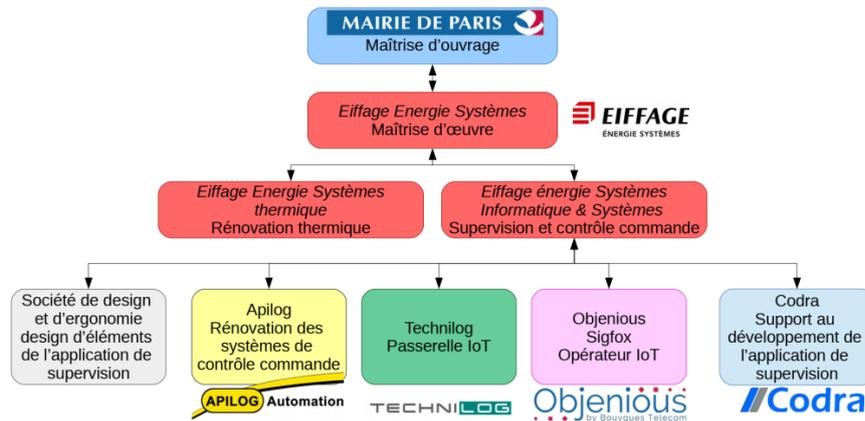


Figure 2 : Les acteurs du projet de supervision énergétique des bâtiments

1.2. Les problématiques du projet

- Les centres thermiques de la ville de Paris, conçus à différentes périodes, par différentes sociétés, sont équipés de manière très hétérogène. L'uniformisation de l'ensemble des systèmes de contrôle-commande aurait un coût trop important.
- C'est pourquoi il a été décidé pour permettre la supervision énergétique des bâtiments :
 - Pour certains sites, le contrôle-commande de la chaufferie est moderne ou sera rénové complètement. Dans ce cas, les compteurs sont reliés aux automates programmables du site, qui communiquent avec la supervision. Des sondes de température/hygrométrie dans les locaux accueillant les usagers sont installées et leurs données collectées via les serveurs des 2 principaux réseaux d'objets connectés qui couvraient la ville de Paris dès 2016 : Objenius (LoRa) et Sigfox.
 - Pour d'autres sites, ayant une chaufferie en état correct mais non communicante, il a été choisi de simplement ajouter des capteurs (température/hygrométrie, compteurs d'eau, de vapeur, de gaz et d'électricité) dont les données sont collectées via les serveurs Objenius (LoRa) et Sigfox.
- Les données échangées entre les sites et les serveurs de la ville de Paris doivent rester confidentielles.
- L'application sera utilisée par un nombre n'important de personnes (200 personnes ont

d'ors et déjà un compte pour l'application Android de supervision) aux profils très différents à la ville de Paris. Un soin particulier devra donc être apporté à l'ergonomie de l'application.

1.3. Les acteurs du projet

Eiffage Energie Systèmes, division Informatique et Systèmes est chargée de la partie Supervision et du contrôle-commande. L'essentiel des réalisations en contrôle-commande est sous-traité à une société d'automatisme.

Pour la partie supervision, une société de design a permis d'améliorer nettement l'ergonomie et l'esthétique de l'application. La société Codra, éditrice du logiciel Panorama a apporté son soutien technique pour les développements informatiques (création d'une application Android notamment) sur le logiciel.

La société Technilog a conçu les serveurs d'acquisition mettant à disposition de la supervision les données des automates et des 5500 objets connectés LoRa et SigFox. Connit, société toulousaine spécialisée dans les réseaux IoT, a conçu ces objets.

Objenius et Sigfox ont accompagné Eiffage Energies dans la mise en place de ce réseau de capteurs précurseur.

1.4. L'application de supervision

Sur l'application de supervision, accessible depuis un simple navigateur web pour toute personne enregistrée, une cartographie permet de situer les centres thermiques et de visualiser les sites en défaut.

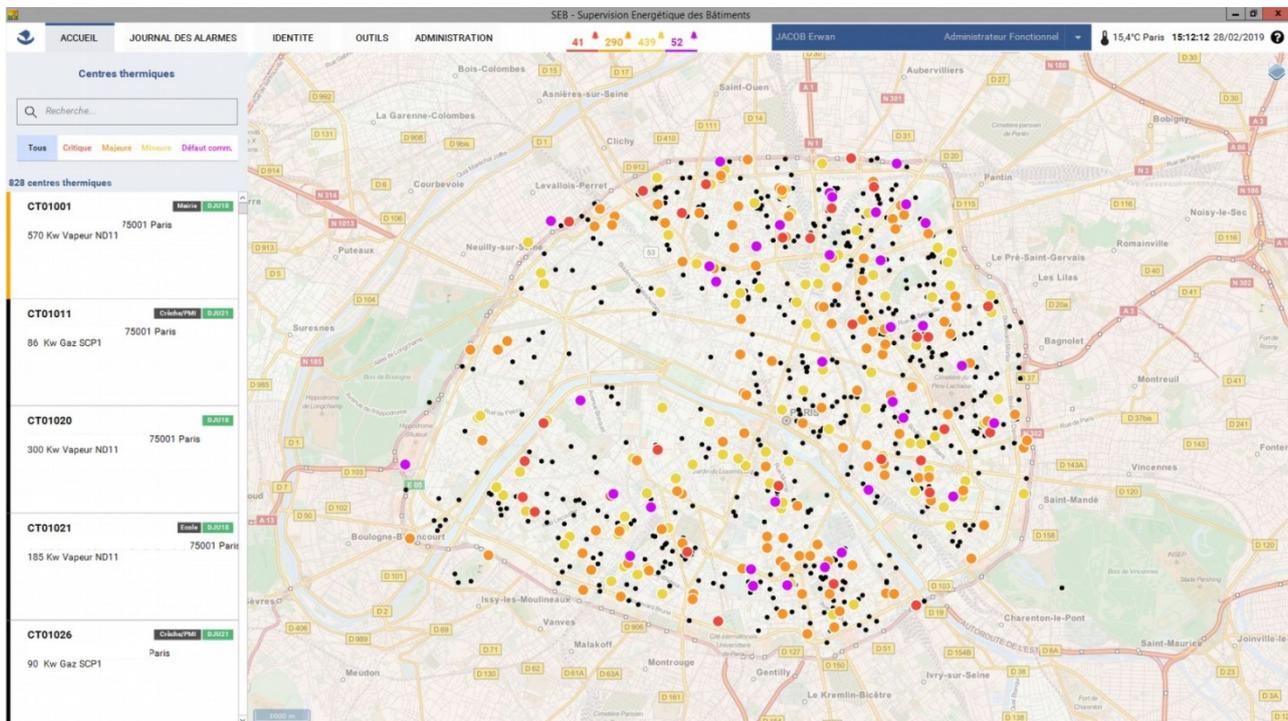


Figure 3 : Cartographie de l'application de supervision

Pour chaque site, différentes vues permettent ensuite d'accéder aux informations nécessaires à la surveillance et à la maintenance des centres thermiques.

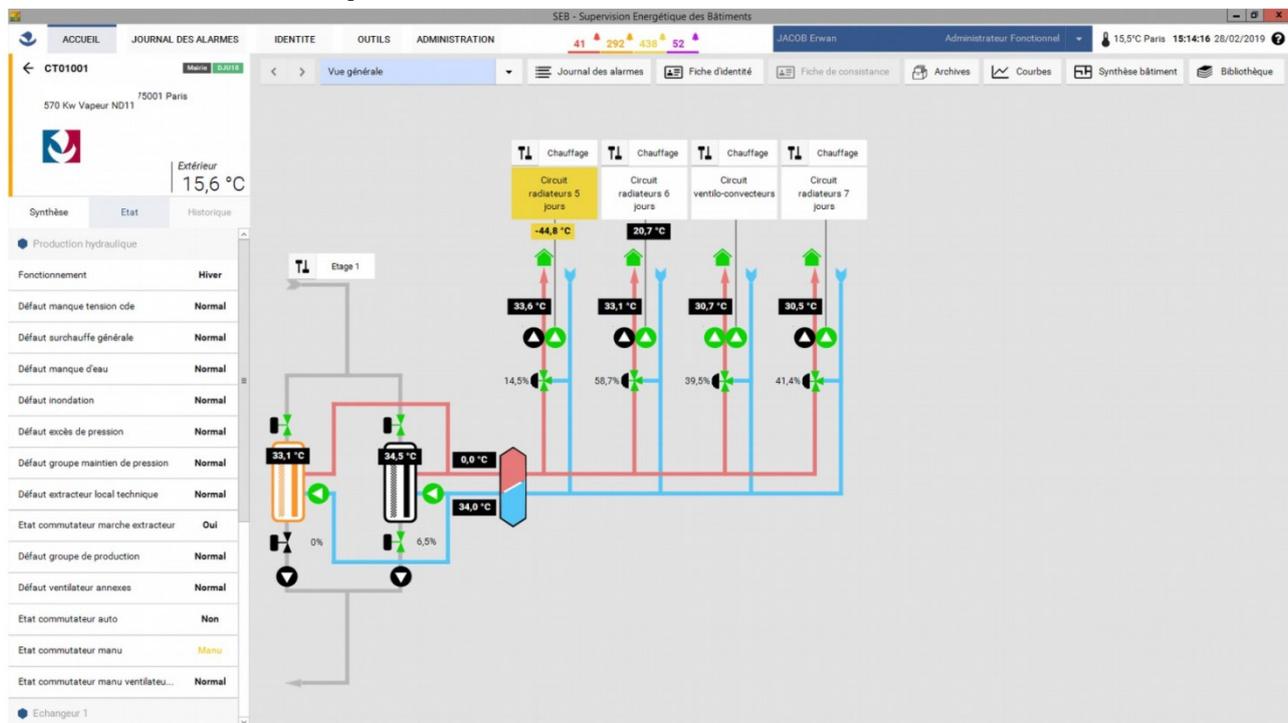


Figure 4 : Supervision d'une chaufferie d'un bâtiment de la ville de Paris

1.5. L'application Android

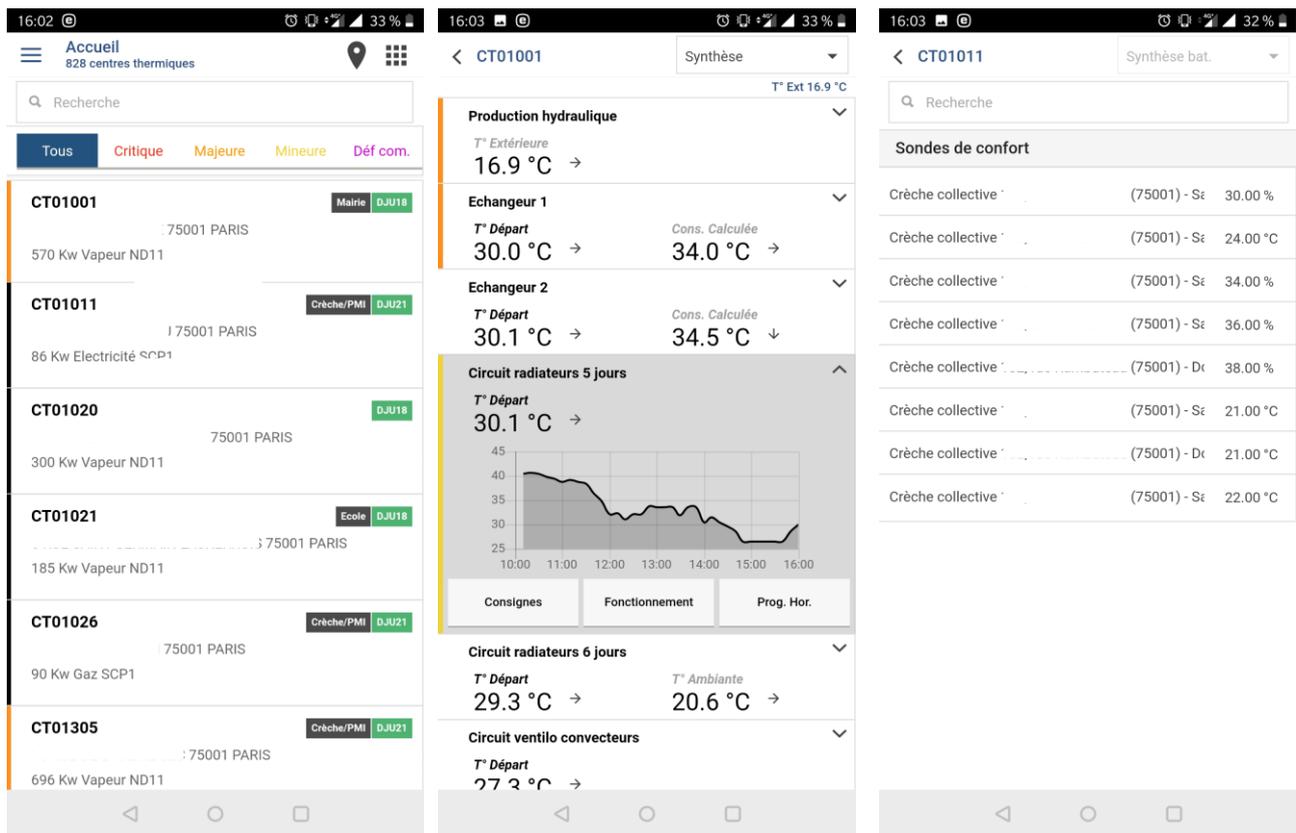


Figure 5 : Divers écrans de l'application Android

Eiffage Energie a développé spécifiquement pour ce projet une application Android permettant aux techniciens de la mairie de Paris d'accéder via leur smartphone aux données de tous les centres thermiques, pour les aider dans la maintenance.

2. Architecture du réseau de communication

La valeur ajoutée de ce projet de supervision énergétique des bâtiments vient en grande partie de l'acquisition d'un grand nombre de données et de leur mise à disposition d'applications (superviseur, application Android, base de données SQL disponible pour des analyses énergétiques).

Voici l'architecture réseau, un peu simplifiée (il y a dans les faits 2 serveurs Panorama et 2 serveurs Dev I/O pour les automates Trend, les sondes peuvent envoyer leurs données par LoRa/Objenious ou Sigfox), du système :

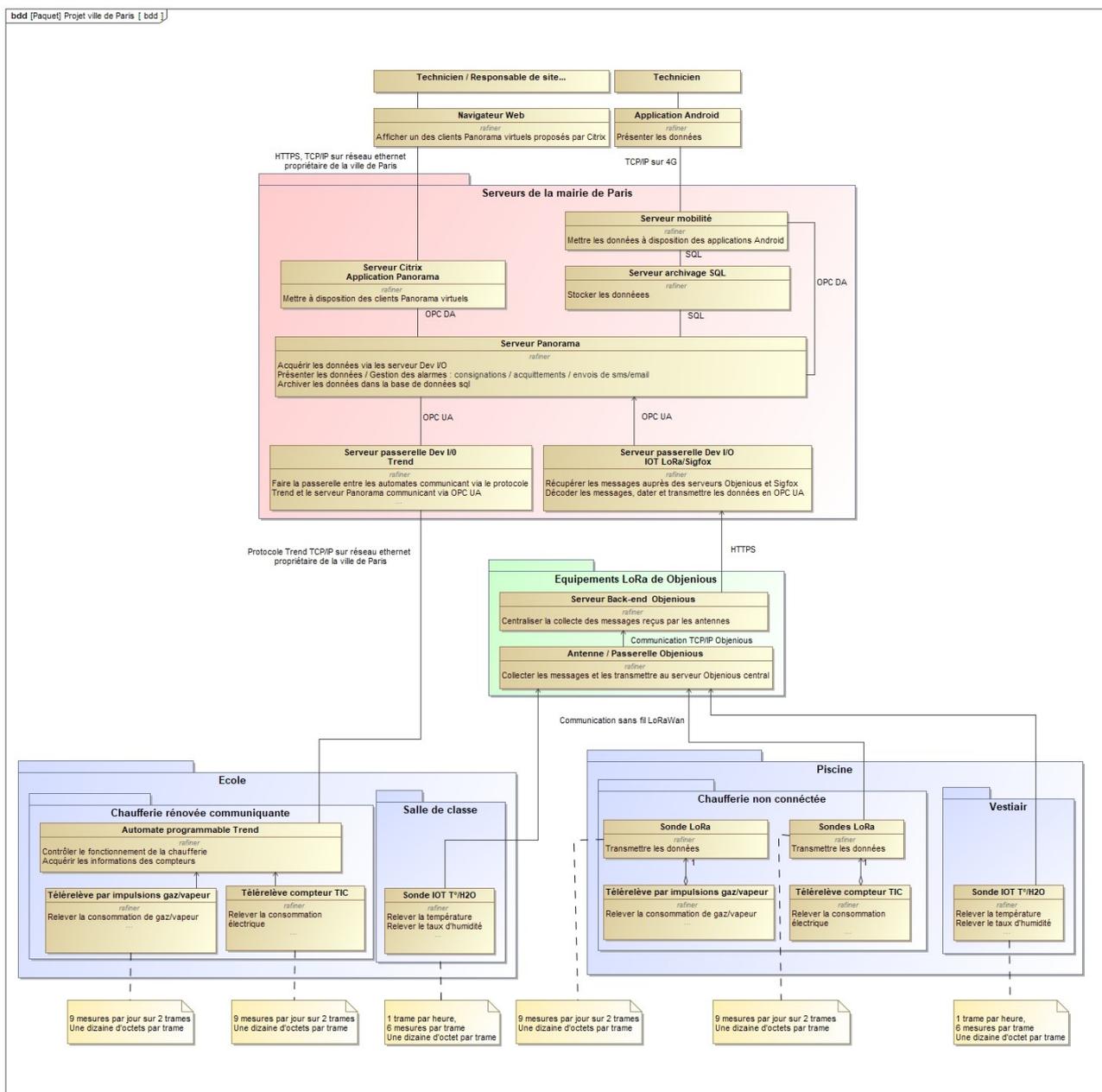


Figure 6 : Architecture réseau du projet de supervision énergétique des bâtiments

2.1. Les sondes IoT

Deux types de sondes, fournies par la société Connit et communiquant en LoRa et Sigfox, sont utilisées :

- Des sondes de température/humidité, placées dans des locaux accueillant des usagers. Elles font une mesure toutes les 10 mn et envoient une trame chaque heure avec ces données.
- Des sondes de relève de compteurs. Placées proches des compteurs, elles relèvent les informations via la sortie impulsions des compteurs. elles envoient 2 trames par jour, avec 9 mesures chacune. La durée de vie estimée de la batterie 3,6V / 7,7Ah est de 5 ans.



Figure 7 : Sonde Connit de température et humidité LoRa/Sigfox



Figure 8 : sonde Connit de relève de compteur



Figure 9 : Module ouvert, avec sa pile et sa carte électronique

Ces sondes Connit sont basés sur des modules Nemeus composés de :

- un microcontrôleur STM32L151, Cortex M3 optimisé pour les applications très faible consommation,
- un transceiver 868 MHz LoRa/Sigfox Semtech SX1272.

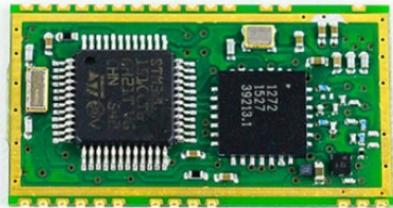


Figure 10 : Module LoRa/Sigfox Nemeus

La mise en service d'une sonde LoRa/Sigfox est très rapide. Dotée d'une batterie, il suffit de la fixer mécaniquement à l'emplacement prévu (et de la connecter au compteur si c'est une sonde de relève). Il faut alors renseigner son identifiant (n°série Sigfox ou DevEUI pour LoRa) dans le serveur Dev I/O, de sorte d'assurer la récupération des données.

Le choix entre LoRa et Sigfox est fait 15 jours après les premières communications d'un objet, en regardant les taux de succès sur chacun des 2 réseaux.

Les sondes en Sigfox faisant 3 envois pour assurer un meilleur taux de succès, leur consommation est

légèrement supérieure au LoRa. C'est pourquoi actuellement la majeure partie des sondes utilisent le protocole LoRa.

La disponibilité des sondes est très importantes. Aujourd'hui, seules 111 sondes sur les 5500 ne communiquent plus. Ce sont essentiellement des sondes de relève de compteurs, placées dans des chaufferies en sous-sol, à la limite de la couverture LoRa/Sigfox.

2.2. Les serveur d'acquisition Dev/IO

Les sondes LoRa envoient une trame cryptée, avec horodatage à la source, à l'antenne/passarelle qui transmet au serveur Objenius.

En parallèle, le serveur DevIO développé par la société Technilog vient chercher les données brutes sur le serveur Objenius (utilisation du protocole HTTP REST), interprète les données, reconstitue les dates, et les transmet au superviseur Panorama via le protocole OPC UA, protocole TCP/IP très populaire en supervision.

Le superviseur Panorama stocke alors les données dans un serveur SQL, où elles pourront être extraite pour un affichage sur le superviseur ou sur l'application mobile.

La société ATOS a également participé pour la sécurisation des transferts de données.

3. Conclusion

Via l'adoption de nouveaux outils et de nouvelles compétences, l'utilisation des réseaux longue portée, très basse consommation et bas débits opérés ont permis à Eiffage Energie Systèmes, pour des coûts d'installation très faibles :

- La supervision du confort dans les salles accueillant des usagers pour les bâtiments ayant une chaufferie communicante,
- Une supervision limitée mais réelle des chaufferies non communicantes non rénovées.

L'assistance à la maintenance est opérationnelle et l'analyse des grandes quantités de données collectées pour optimiser les dépenses énergétiques et prédire les pannes est à venir. L'extension du projet au-delà des 400 sites thermiques initiaux est en cours.

C'est une première expérience à grande échelle d'utilisation des réseaux IoT. Le métier d'installateur très proche du matériel y laisse place en partie à de nouveaux métiers dans l'intégration et la sécurité de ces nouveaux réseaux.

Géolocalisation dans un réseau LoRaWAN

WAFAE BAKKALI^{1,2}, MICHEL KIEFFER¹, MASSINISSA LALAM² ET THIERRY LESTABLE²

¹ Laboratoire des Signaux et Systèmes (L2S, UMR CNRS 8506) `CNRS-CentraleSupélec-Université Paris-Sud`

³, rue Joliot Curie 91192 Gif-sur-Yvette, France Email: michel.kieffer@l2s.centralesupelec.fr

² Sagemcom, 250 Route de l'empereur, 92500 Rueil-Malmaison

Email: massinissa.lalam@sagemcom.com, thierry.lestable@sagemcom.com

Résumé: Cet article présente une approche exploitant un filtre de Kalman étendu afin de géolocaliser des objets dans un réseau de type Low Range Wide Area Networks (LoRaWAN). Les résultats expérimentaux obtenus lors d'une campagne de mesure permettent d'évaluer la précision de localisation qu'il est possible d'atteindre dans ce type de réseau en employant une approche simple.

1. Introduction

L'Internet des objets (IdO) [1] représente l'ensemble des objets, qui grâce à leur connexion à Internet, ont la possibilité de communiquer entre eux et avec l'environnement extérieur. Ces objets peuvent alors émettre et recevoir des mesures de diverses grandeurs physiques (température, pression, hygrométrie...), transmettre des informations permettant de les localiser, servir d'actionneurs... L'IdO et les technologies qui s'y rattachent représentent une nouvelle révolution industrielle, car l'impact des objets connectés nos vies est grandissant. Plusieurs domaines d'application ont déjà bénéficié de l'IdO, tels que les villes intelligentes [2], l'internet industriel [3], l'agriculture de précision [4], les véhicules connectés [5], ou encore la santé [6]. L'étude publiée dans [7] estime que le nombre d'objets connectés à l'internet, toutes technologies confondues (voitures, appareils, équipements industriels, etc...) atteindra 50 milliards d'ici 2020.

Avec l'émergence de l'IdO, les technologies de communication LPWA (Low Power - Wide Area) [8] représentent une alternative intéressante aux protocoles de communication à courte portée existants tels que WiFi, Bluetooth, ou les communications en champ proche (NFC). En raison de leur capacité à répondre aux exigences des applications IdO: faibles niveaux de consommation d'énergie, portée importante et faible débit binaire, les technologies LPWA ont été adoptées par de nombreux acteurs de la recherche académique et industrielle et normes de recherche universitaires et industrielles [9]. Parmi ces technologies, la solution LoRaWAN (Long Range Wide Area Network), soutenue par l'alliance LoRa [10], est la seule technologie ouverte, globale et mature, constituant un standard de fait pour le déploiement de réseaux de type IdO sans licence.

La localisation est un sujet de recherche très important dans l'IdO [11]. Plus spécifiquement, comme indiqué dans [12], la localisation est une caractéristique essentielle pour plus de 50% des applications de l'IdO. Cependant, la plupart des solutions de localisation actuelles reposent sur le système de positionnement global (GPS), généralement incompatible avec les contraintes de faible coût et de faible consommation énergétique des systèmes de l'IdO.

La localisation est un problème classique qui a été largement étudié dans de nombreux domaines applicatifs, notamment dans le contexte de la robotique mobiles [13] ou des réseaux de capteurs [14].

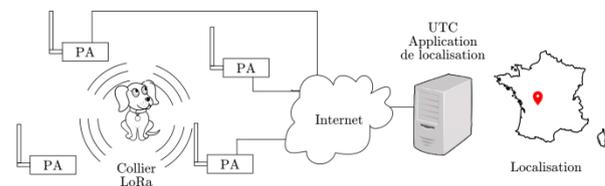


Figure 1 : Eléments d'un réseau LoRaWAN pour la géolocalisation

Plusieurs algorithmes et approches ont été proposés pour l'estimation de la localisation. Ils s'appuient souvent sur l'exploitation de l'instant d'arrivée (ToA) ou de la différence entre les instants d'arrivée (TDoA) [16] d'un signal acoustique ou électromagnétique émis par l'objet à localiser et capté par des balises dont la position est connue. Dans les approches reposant sur le ToA, une synchronisation d'horloge entre la source et les récepteurs est nécessaire pour estimer avec précision le temps de vol du signal et l'emplacement de l'objet. Dans les approches exploitant les TDoA, cette synchronisation n'est pas nécessaire, mais les horloges des récepteurs doivent être synchronisées.

Lorsqu'une succession de mesures de type ToA ou TDoA sont disponibles, mais étalées dans le temps, il est en général intéressant de les prendre en compte en corrigeant progressivement l'estimée de la localisation, plutôt que de réaliser une nouvelle localisation à

chaque arrivée d'un nouveau jeu de mesure. Pour cela, le filtre de Kalman est un algorithme récursif permettant d'estimer l'état d'un système (dans notre contexte la localisation d'un objet) à partir de mesures [17]. Le filtre de Kalman étendu est une extension du filtre de Kalman classique aux systèmes dont la dynamique de l'état et les équations décrivant le processus de mesure sont non linéaires [18]. L'objectif de cet article est de présenter une utilisation du filtre de Kalman étendu pour la géolocalisation d'objets déployés dans un réseau LoRaWAN à l'aide d'une approche de type TDoA. Le reste de cet article est organisé de la manière suivante. Le paragraphe 2 introduit le problème de localisation ainsi que les modèles de mesure. La structure du filtre de Kalman étendu, qui réalise une implantation récursive d'un estimateur au sens du maximum *a posteriori* est présentée au paragraphe 3. Des exemples de localisation à l'aide de mesures effectuées en environnement urbain sont détaillés au paragraphe 4. Le paragraphe 5 conclut cet article.

2. Notations et modèle de mesure

2.1. Notations

Nous considérons un réseau de type LoRaWAN constitué de N points d'accès (PA) statiques dont les positions dans un repère attaché à l'environnement sont $x_i = (x_{i1}, x_{i2}, x_{i3})^T, i = 1, \dots, N$. Ces PA sont équipées d'antennes émettrices/réceptrices LoRa et d'une passerelle afin de les relier au réseau IP. Ceci permet de transmettre les messages des PA à une unité de traitement centrale (UTC) gérée par l'opérateur du réseau LoRaWAN, voire la figure 1. Les N PA sont supposés parfaitement synchronisés, par exemple grâce aux horloges des récepteurs GPS dont ils sont équipés. Ces horloges servent de référence.

Soit $z = (z_1, z_2, z_3)^T$ la position d'un objet que l'on cherche à localiser. L'horloge de l'objet n'est pas nécessairement synchrone avec celle des PA. L'objet est équipé d'une puce LoRa qui émet périodiquement un signal contenant un message qui peut être reçu par un ou plusieurs PA. Si le signal émis par l'objet est correctement décodé par un PA, celui-ci transmet un paquet de données à l'UTC. Le paquet peut contenir différentes informations associées au message émis par l'objet telles que l'identité de l'objet (son adresse MAC), l'instant d'émission du signal (selon l'horloge de l'objet), l'instant de réception (selon l'horloge du PA), un compteur, la puissance avec laquelle le signal a été reçu (received signal strength - RSS), ou encore le rapport signal-à-bruit. Lorsque le signal émis par un objet est reçu par différents PA, l'UTC va recevoir autant de messages contenant des informations qui vont permettre de géolocaliser l'objet. Cette approche est appelée *géolocalisation passive*, car tout type de mesure provenant d'un objet équipé d'une puce

LoRa peut être exploité pour la géolocalisation. Il n'est pas nécessaire que la puce envoie un message dédié. Supposons que l'émission du k -ième message par l'objet localisé en $z_k = (z_{1,k}, z_{2,k}, z_{3,k})^T$ se fait à l'instant $t_{0,k}$. Ce message est reçu par les différents PA aux instants $t_{i,k}, i = 1, \dots, N$. L'objectif est d'estimer z_k à partir de mesures bruitées $y_{i,k}$ de ces temps d'arrivée et de la position des différents PA.

2.2. Modèle de mesure

En supposant qu'il existe un trajet direct sans réflexion entre l'objet et le i -ième PA, l'instant de réception du k -ième message par l'objet s'écrit

$$t_{i,k} = t_{0,k} + \frac{1}{c} \|x_i - z_k\|_2. \quad (1)$$

où c est la vitesse de la lumière et où $\|\cdot\|_2$ représente la norme Euclidienne. La valeur mesurée de $t_{k,i}$ est

$$y_{i,k}^{TA} = t_{i,k} + \epsilon_{i,k}, \quad (2)$$

où $\epsilon_{i,k}$ est la réalisation d'une variable aléatoire que nous supposons Gaussienne de moyenne nulle et de variance $\sigma_{k,i}^2$.

La principale difficulté avec (1) vient du fait que, même si l'instant d'émission $t_{0,k}$ du k -ième signal est placé dans le paquet émis par l'objet, cet instant d'émission est exprimé dans la base de temps de l'objet qui n'est pas celle des PA. Cette information est donc difficilement exploitable. Deux approches peuvent alors être envisagées. On peut chercher à estimer $t_{0,k}$ en plus de la position z_k de l'objet, ce qui correspond à une estimation de la position de l'objet à partir des mesures (2) des temps d'arrivée (TA) des signaux sur les PA. On peut également chercher à déterminer z_k à partir de la mesure des différences de temps d'arrivée (DTA) entre paires de PA. C'est cette seconde approche qui sera développée dans la suite.

L'estimation de z_k par DTA nécessite de définir un PA de référence pour chaque ensemble de mesure disponible $y_{i,k}, i = 1, \dots, N$. Ce PA de référence pourra être celui qui recevra le signal en premier ou avec le meilleur rapport signal-à-bruit. Sans perte de généralité, nous supposons que l'indice z_k du PA de référence pour la k -ième série de mesures est $r_k = N$. Dans ces conditions, la DTA entre le PA i et le PA servant de référence s'exprime à partir de (1) comme

$$t_{i,k} - t_{N,k} = \frac{1}{c} (\|x_i - z_k\|_2 - \|x_N - z_k\|_2), \quad (3)$$

qui ne fait plus apparaître $t_{0,k}$. Les mesures correspondantes des DTA sont déduites de (2) et s'expriment comme suit

$$y_{i,k}^{DTA} = h_i(z_k) + \epsilon_{i,k} - \epsilon_{N,k}, i = 1, \dots, N - 1, \quad (4)$$

avec le modèle de mesure

$$h_i(z_k) = \frac{1}{c} (\|x_i - z_k\|_2 - \|x_N - z_k\|_2),$$

La fonction de mesure $h_i(z_k)$ est non-linéaire en z_k . Le vecteur des mesures des DTA peut être introduit

$$y_k^{DTA} = (y_{1,k}^{DTA}, \dots, y_{N-1,k}^{DTA})^T.$$

On a alors

$$y_k^{DTA} = h(z_k) + n_k \quad (6)$$

avec

$$h(z_k) = (h_1(z_k), \dots, h_{N-1}(z_k))^T.$$

et

$$n_k = (\epsilon_{i,k} - \epsilon_{N,k}, \dots, \epsilon_{N-1,k} - \epsilon_{N,k})^T.$$

Le bruit de mesure n_k est toujours Gaussien de moyenne nulle, mais sa matrice de covariance est

$$\Gamma_k^{DTA} = \begin{pmatrix} \sigma_{1,k}^2 + \sigma_{N,k}^2 & \sigma_{N,k}^2 & \dots & \sigma_{N,k}^2 \\ \sigma_{N,k}^2 & & & \\ \dots & & & \\ \sigma_{N,k}^2 & \dots & \sigma_{N,k}^2 & \sigma_{N-1,k}^2 + \sigma_{N,k}^2 \end{pmatrix}$$

3. Méthode d'estimation

3.1. Principe

Nous allons mettre en œuvre une méthode d'estimation récursive causale au sens du maximum *a posteriori*. Cette approche consiste à déterminer la densité de probabilité *a posteriori* $p(z_k | y_{1:k})$ de z_k pour tout $k \geq 1$, où $y_{1:k}$ est le vecteur rassemblant les mesures disponibles entre l'instant d'émission 1 et l'instant de réception k . A partir de $p(z_k | y_{1:k})$, il est possible de déduire une estimation de z_k au sens du maximum *a posteriori*

$$\hat{z}_k = \arg \max_{z_k} p(z_k | y_{1:k}) \quad (8)$$

et la matrice de covariance *a posteriori*

$$P_k = \int_{z_k} (z - \hat{z}_k)^T (z - \hat{z}_k) p(z_k | y_{1:k}) dz_k, \quad (9)$$

permettant de caractériser l'incertitude d'estimation de z_k .

Il est possible d'évaluer $p(z_k | y_{1:k})$ récursivement à l'aide de l'équation de Chapman-Kolmogorov, voir [24], [22]

$$p(z_k | y_{1:k}) \propto p(y_k | z_k) \int_{z_{k-1}} p(z_k | z_{k-1}) p(z_{k-1} | y_{1:k-1}) dz_{k-1} \quad (10)$$

à partir de $p(z_{k-1} | y_{1:k-1})$, d'un modèle de l'évolution de z donné par $p(z_k | z_{k-1})$, et de la fonction de vraisemblance $p(y_k | z_k)$.

Dans le cas où les bruits de mesures sont Gaussiens, mais que le modèle de mesure est non-linéaire en z_k , il est possible de calculer une approximation Gaussienne de $p(z_k | y_{1:k})$ à l'aide du filtre de Kalman étendu.

3.2. Filtre de Kalman étendu

Nous supposons que l'évolution de la position de l'objet à localiser est décrite par la dynamique suivante

$$z_k = f(z_{k-1}) + w_k, \quad (11)$$

où w_k est un vecteur Gaussien de moyenne nulle et de matrice de covariance Ω_k . La densité de probabilité $p(z_k | z_{k-1})$ est alors une loi Gaussienne de moyenne $f(z_{k-1})$ et de matrice de covariance Ω_k . Par ailleurs, l'équation d'observation est donnée par (6).

Le filtre de Kalman étendu va alterner des étapes de prédiction et des étapes de correction, voir [24], [22].

1. Etape de prédiction du filtre de Kalman étendu

$$z_k^- = f(z_{k-1})$$

$$P_k^- = F_z(z_{k-1}) P_{k-1} F_z^T(z_{k-1}) + \Omega_k$$

2. Etape de correction du filtre de Kalman étendu

$v_k = y_k - h(z_k^-)$ (erreur de prédiction de la mesure)

$S_k = H_z(z_k^-) P_k^- H_z^T(z_k^-) + \Gamma_k$ (cov. de l'erreur de prédiction)

$K_k = P_k^- H_z^T(z_k^-) S_k^-$ (gain de Kalman)

$z_k = z_k^- + K_k v_k$ (correction)

$P_k = P_k^- - K_k S_k H_z^T(z_k^-)$ (actualisation de la covariance)

avec

$$F_k(z_{k-1}) = \left(\frac{\partial f(z)}{\partial z^T} \right) (z_{k-1})$$

et

$$H_k(z_k^-) = \left(\frac{\partial h(z)}{\partial z^T} \right) (z_k^-)$$

sont les Jacobiennes de f et de h évaluées en z_{k-1} et en z_k^- .

Le filtre de Kalman étendu doit être initialisé par un vecteur z_0 et une matrice de covariance P_0 initiales.

3.3. Elimination de mesures aberrantes

A cause de réflexions multiples sur des obstacles de l'environnement, l'onde reçue par un PA ne parvient pas toujours en ligne directe, mais peut subir des trajets multiples. Dans ce cas, le temps d'arrivée mesuré par le point d'accès ne peut plus être décrit par le modèle (1). La mesure correspondante est une mesure dite *aberrante*. Lorsque cette mesure est réalisée par le PA servant de référence, par construction, toutes les composantes du vecteur y_k^{DTA} seront aberrantes et la localisation sera de très mauvaise qualité. Lorsqu'une mesure aberrante est réalisée par un PA qui ne sert pas de référence, seule la composante correspondante de y_k^{DTA} sera aberrante. Le fait de choisir le PA de référence comme celui ayant reçu l'onde émise par l'objet en premier ou avec le rapport signal-à-bruit le plus élevé réduit le risque de contaminer l'ensemble du vecteur y_k^{DTA} .

Afin de réduire l'impact des mesures aberrantes sur la précision de localisation, un mécanisme de détection et d'élimination de mesures aberrantes reposant sur l'approche proposée par [19] a été mis en œuvre. Pour cela, nous calculons la différence entre le vecteur des mesures réelle de DTA y_k^{DTA} et la mesure de DTA simulée $h(z_k^-)$ pour la version prédite z_k^- de la localisation de l'objet à l'instant $t_{0,k}$.

Toute composante i du vecteur d'erreur de prédiction de la mesure $v_k = y_k^{DTA} - h(z_k^-)$ ayant une norme

supérieure à trois fois l'écart type normal $\sqrt{\sigma_{i,k}^2 - \sigma_{N,k}^2}$,

correspondant à la racine carrée des éléments diagonaux de (7), sera considérée comme aberrante et non prise en compte dans la localisation.

4. Résultats

Pour les simulations, nous exploitons une base de mesures d'instant d'arrivée de signaux émis avec une période d'une minute par 4 objets statiques (O_1, \dots, O_4) placés dans un réseau LoRaWAN en banlieue de Paris. La position réelle de chaque objet est connue. La dynamique suivante pour la localisation d'un objet a été considérée

$$z_k = z_{k-1} + w_k, \\ \text{avec} \\ \Omega_k = \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{pmatrix}$$

ce qui correspond à un déplacement de l'ordre de 1 m par minute et représente un modèle raisonnable pour un objet statique ou quasi-statique. L'écart-type des bruits de mesure sur les instants d'arrivée des signaux émis par les objets est de l'ordre de 5×10^{-7} s, ce qui correspond à une erreur de mesure de l'ordre de 150 m, qui se traduit par un écart type de l'ordre de 210 m sur les mesures des DTA.

Lors de l'initialisation du filtre de Kalman étendu, l'estimée initiale z_0 correspond au barycentre de la position des 5 PA ayant reçu le premier signal émis par chaque objet en premier. Cette initialisation est clairement sous-optimale. Cependant, réaliser une estimation initiale avec une méthode plus précise n'apporte pas de gain significatif à partir de la dixième série de mesure lorsque le filtre de Kalman étendu est employé. La matrice de covariance initiale est telle que

$$P_0 = \begin{pmatrix} 100^2 & 0 & 0 \\ 0 & 100^2 & 0 \\ 0 & 0 & 100^2 \end{pmatrix}, \quad (12)$$

correspondant à une erreur de localisation typique de 100 m sur chaque composante.

La figure 2 illustre l'évolution de l'erreur d'estimation au fil des itérations pour les 4 objets considérés.

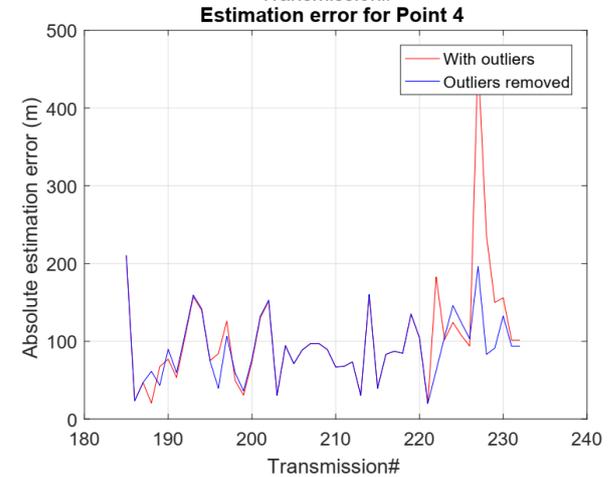
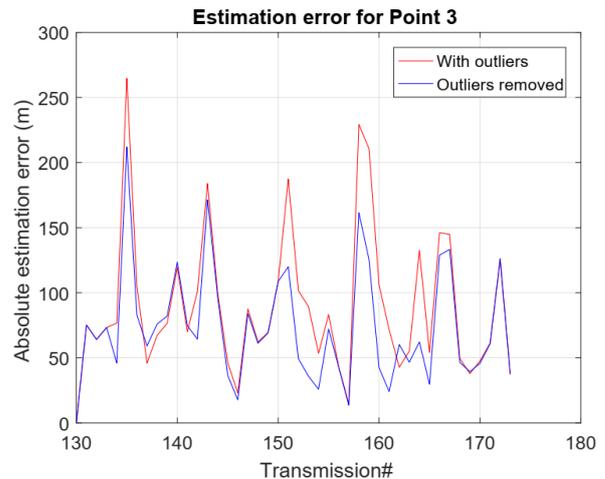
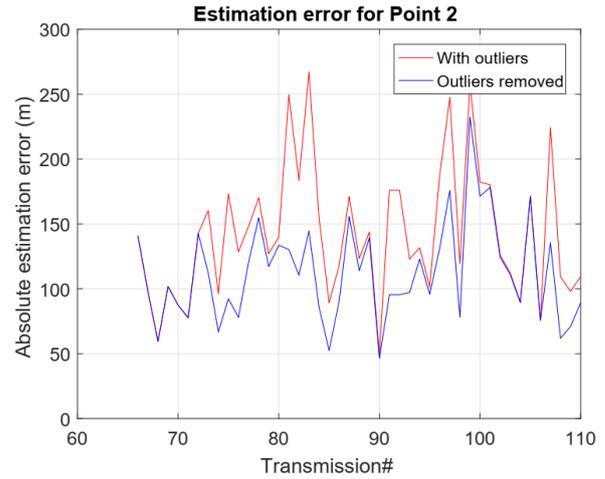
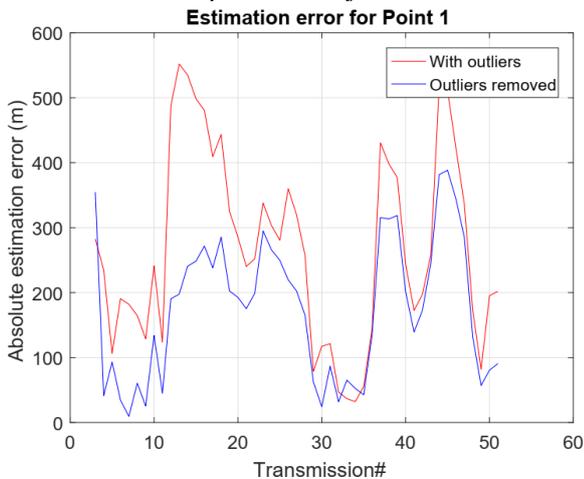


Figure 2 : Evolution de la norme de l'erreur de localisation des objets 1 à 4

La figure 3 montre la fonction de répartition de l'erreur de localisation. Ces fonctions de répartition permettent de déterminer la proportion d'instant de mesures pour laquelle la norme de l'erreur de mesure est inférieure à un certain seuil. Ainsi, pour l'objet O_3 , l'erreur de localisation est dans 70% des cas inférieure à 100 m. Pour l'objet O_1 , sans réaliser l'élimination des mesures aberrantes, l'erreur de mesure n'est inférieure à 200 m que dans 40% des cas, alors qu'en éliminant les mesures aberrantes, elle est inférieure à 200 m dans plus de 60% des cas. L'élimination de mesures

difference of arrival measurements,” Review of Scientific Instruments, vol. 87, pp. 1-13, 2016.

[17] R. E. Kalman, “A New Approach to Linear Filtering and Prediction Problems,” Transactions of the ASME - Journal of Basic Engineering vol. 82: pp. 35-45, 1960.

[18] E. Zerdali and M. Barut, “The Comparisons of Optimized Extended Kalman Filters for Speed-Sensorless Control of Induction Motors,” IEEE Transactions on Industrial Electronics, vol. 64, no. 6, pp. 340 - 4351, 2017.

[19] E. M. Knorr, R. T. Ng and V. Tucakov, “Distance-based outliers: algorithms and applications,” The VLDB Journal, vol. 8, pp. 237-253, 2000.

[20] T. Lestable and M. Lalam, “IoT LPWAN Geolocation: LoRaWAN bringing disruption,” LPWAN Conference, 2017.

[21] D. Fraser and J. Potter. The optimum linear smoother as a combination of two optimum linear filters. *IEEE Transactions on Automatic Control*, 14(4):387–390, aug 1969.

[22] Jouni Hartikainen, Arno Solin, and Simo Sarkk “ a. ” *Optimal Filtering with Kalman Filters and Smoothers: a Manual for the Matlab toolbox EKF/UKF*. Aalto University.

[23] R. E. Helmick, W. D. Blair, and S. A. Hoffman. Fixed-interval smoothing for markovian switching systems. *IEEE Transactions on Information Theory*, 41(6):1845–1855, Nov 1995.

[24] Recursive Bayesian inference on stochastic differential equations. *S. Sarkk “ a ”*. PhD thesis, Helsinki University of Technology, 2006.

Le réseau Sigfox et l'internet des objets (IoT)

AURELIEN LEQUERTIER

Sigfox, 112, avenue de Wagram
75017 Paris, France
aurelien.lequertier@sigfox.com
Sigfox.com

Résumé: D'ici 2020, des milliards d'objets seront connectés à Internet à travers le monde; ils pourront communiquer leurs données dans le Cloud et participer à la transformation numérique de notre environnement. Pour cela, disposer d'une solution de connectivité mondiale, économique et très peu consommatrice en énergie est fondamental. C'est le défi que relève Sigfox en déployant un réseau bas-débit dédié. Depuis sa création en 2010, Sigfox est reconnu comme un pionnier et un leader international dans un secteur qui bouscule déjà les modèles d'affaire et révolutionnera le monde dans lequel nous vivons. L'ambition de Sigfox, incarnée dans le slogan « Make Things Come Alive », est de donner une voix au monde physique et de permettre à ces objets de jouer un rôle dans l'optimisation des processus industriels et dans le développement économique, social et environnemental.

1. Présentation de Sigfox

1.1. Le principe

Sigfox est l'initiateur du réseau "0G", le plus grand réseau IoT (« Internet Of Things », internet des objets) au monde conçu pour connecter des appareils simples, à basse consommation et à faible coût à Internet. La technologie unique de Sigfox permet d'envoyer et de recevoir des données sans avoir besoin de connexions complexes ou de cartes SI.



Figure 1 : Principe du réseau Sigfox

Les appareils écoutent et captent simplement des messages radio formatés dans le monde entier, en utilisant un élément aussi simple et aussi petit que la puce de silicium que l'on trouve dans une télécommande. Le réseau relie les objets qui doivent communiquer de très petits messages et permet de constituer un grand nombre de cas d'utilisation de l'IoT, du suivi des expéditions de conteneurs à la surveillance des bornes d'incendie, en passant par la sécurisation des bâtiments. Avec son écosystème complet de partenaires, qui développent, vendent et assurent le service après-vente des appareils compatibles avec sa technologie, Sigfox aide les entreprises à accélérer leur transformation numérique, à développer de nouveaux services et à intégrer plus de valeur dans leur(s) activité(s).

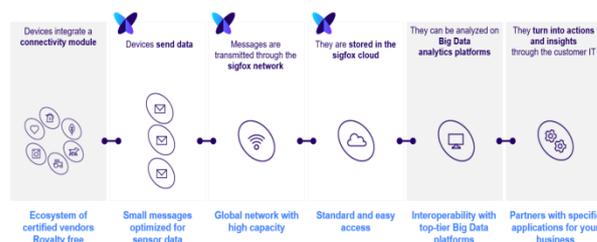


Figure 2 : un réseau pour les objets connectés qui communique les informations de votre appareil au système informatique du client

1.2. Sigfox connecte 60 pays et régions

Sigfox est actuellement présent sur les cinq continents. Le réseau est déployé à l'échelle nationale dans 21 pays et régions : Afrique du Sud, Belgique, Danemark, Espagne, Finlande, France, Irlande, Italie, Japon, Luxembourg, Malte, Maurice, Nouvelle-Zélande, Oman, Pays-Bas, Portugal, République Tchèque, Réunion, Singapour, Slovaquie et Taïwan. 39 pays et régions sont en cours de déploiement : Allemagne, Argentine, Australie, Autriche, Brésil, Canada, Chili, Colombie, Corée du Sud, Costa Rica, Croatie, Emirats arabes unis, Equateur, Estonie, États-Unis, Guatemala, Honduras, Hongrie, Hong Kong, Kenya, Liechtenstein, Malaisie, Mexique, Nicaragua, Norvège, Nouvelle-Calédonie, Panama, Pérou, Pologne, Roumanie, Royaume-Uni, Salvador, Suède, Suisse, Swaziland, Thaïlande, Trinidad & Tobago, Tunisie et Uruguay. Le réseau Sigfox couvre aujourd'hui 60 pays, 5 millions de km² et 1 milliard de personnes. Sigfox comprend 6,2 millions d'objets connectés dans son réseau.

1.3. Une entreprise internationale, née en France et soutenue par des investissements

Créée par Ludovic Le Moan et Christophe Fourtet, Sigfox possède un siège social à Labège près de Toulouse, dans la « French IoT Valley », et dispose de bureaux à Paris, Madrid, Munich, Boston, San Francisco, Dallas, Dubaï, Singapour et Tokyo. Sigfox est soutenu par des opérateurs télécoms internationaux tels que Telefonica, SK Telecom et NTT DOCOMO Ventures, ainsi que des investisseurs stratégiques tels que Samsung, Intel Capital, Air Liquide, Total et Salesforce. Au total, plus de 5 tours de table ont été réalisés pour un investissement de 300 millions d'euros afin de soutenir Sigfox et accélérer son expansion internationale.

1.4. Les grands défis IoT auxquels s'attaque Sigfox

La plus faible consommation d'énergie : Sigfox permet aux capteurs de fonctionner sans batterie, supprimant ainsi les besoins en maintenance. Aujourd'hui, de multiples sources d'énergie dans le monde physique permettent la récupération d'énergie, y compris les ondes solaires, éoliennes et électromagnétiques. La simplicité de la technologie permet d'offrir la meilleure expérience utilisateur possible avec des coûts de maintenance très bas. Sigfox croit fortement au développement d'objets qui généreront eux-mêmes l'énergie dont ils ont besoin avec l'ambition, qu'un jour, le besoin de remplacer ou de recharger des batteries n'existe plus.

Le coût le plus faible : le coût et la complexité du silicium requis pour connecter des objets doivent être considérablement réduits. La simplicité de la technologie Sigfox le permet. Aujourd'hui, un module de carte SIM coûte souvent jusqu'à 40 \$, un module sur notre réseau ne coûte que quelques dollars. A ce prix, il est possible de connecter virtuellement n'importe quel objet et ce, à moindre coût. L'écosystème de Sigfox a récemment annoncé les **modules les moins chers du monde** à partir de seulement 2\$. Sigfox a également dévoilé un service simplifié de connectivité qui transforme n'importe quel appareil sans fil avec une connexion courte portée en appareil IoT longue portée fonctionnant avec un module ne coûtant que 0,20 \$.

Une technologie complémentaire : Sigfox est compatible avec les technologies Bluetooth, GPS 2G / 3G / 4G et en WiFi. En combinant d'autres solutions de connectivité avec le réseau Sigfox, les cas d'usage et l'expérience utilisateur peuvent être considérablement améliorés. Le fait de combiner Sigfox avec les technologies cellulaires dans un objet connecté, inclut la possibilité d'accroître la sécurité, la fiabilité (sauvegarde et résolution de problèmes) et d'assurer le désencombrement.

1.5. La première offre « Réseau IoT as-a-service » au monde

Solutions « connection » :

Admira Blue : c'est la solution ultra low-cost de Sigfox. Cette technologie permet à des appareils peu coûteux, à partir de seulement 2 \$, d'envoyer de minuscules messages via une connexion longue portée, en utilisant peu de ressources énergétiques.

Admiral Ivory : c'est un service simplifié de connectivité qui rend possible la transformation de n'importe quel appareil sans fil avec une connexion courte portée en appareil IoT longue portée fonctionnant avec un module ne coûtant que 0,20 \$ et utilisant un élément aussi simple que la puce de silicium que l'on trouve dans une télécommande pour porte de garage. Admiral Ivory ouvre la voie de la création d'actifs connectés, jetables, et le développement d'applications IoT ponctuelles. Cela représente une opportunité importante pour les industries de l'emballage, de la logistique et du commerce de détail.

Solutions « Cognition » :

Monarch : c'est une offre un service capable d'assurer une connectivité internationale transparente. Ainsi, les appareils seront capables de reconnaître les normes locales de communication et de s'y adapter automatiquement. Sigfox Monarch est un service unique de reconnaissance radio qui permet aux appareils connectés de gérer automatiquement les changements de fréquence radio, sans aucun matériel supplémentaire tel qu'un chipset GPS ou Wi-Fi. En permettant aux actifs « globe-trotters » de s'adapter aux différentes normes de manière transparente et ce, à mesure qu'ils franchissent de nouvelles frontières, Sigfox Monarch offre de nouvelles opportunités commerciales pour les secteurs du transport et de la logistique, fret inclus, et des biens de consommation.

Solution « Localisation » :

Atlas : c'est la fonctionnalité intégrée de géolocalisation la moins chère du monde. Contrairement à la technologie GPS, ce service permet de réduire la consommation énergétique et ne nécessite aucun matériel supplémentaire au-delà de la puce Sigfox déjà intégrée.

2. Exemples d'applications de Sigfox

Les principales familles d'applications sont données ci-dessous et quelques exemples de développements sont ensuite présentés.



Figure 3 : aperçu des différentes applications envisageables par secteur d'activité

Alimenter les villes intelligentes

- **Gestion de l'eau** – LEAKBOT a lancé un appareil connecté intelligent que les consommateurs peuvent installer chez eux pour se protéger contre les dégâts des eaux et qui leur signale les fuites avant qu'elles ne prennent des proportions catastrophiques. Il s'agit d'un seul appareil que n'importe qui peut installer à la maison.
- **Éclairage urbain et gestion des déchets** – SAYME, une société espagnole qui développe des solutions intelligentes d'éclairage et de gestion des déchets, présente son système de lampadaire connecté, qui permet aux administrations locales d'optimiser leur consommation énergétique, d'automatiser la maintenance prédictive et d'améliorer la qualité de l'éclairage. Sa benne à ordures connectée permet de surveiller en temps réel la capacité des réceptacles.

Connecter l'industrie maritime

- **Suivi des flux de fret maritime intercontinentaux de Michelin** – Michelin, Sigfox France et Argon Consulting ont déployé une solution dédiée au suivi des conteneurs maritimes en temps réel, basée sur la technologie et le réseau international de Sigfox. La solution est un service de traçabilité « clé en main » géré par expédition, intégrant les traqueurs, leur logistique et l'accès à la plateforme d'analyse. Elle est évolutive et peut être utilisée pour suivre un nombre élevé de conteneurs. Grâce à ce déploiement, Michelin est capable de suivre ses expéditions, depuis l'entrepôt d'origine jusqu'à leur destination finale.
- **Tracker solaire pour les marins** – HIDNSEEK GPS Live Tracker est un tracker Open Source rechargeable et autonome qui permet de déclencher des alertes générales de géolocalisation et de

mouvement en temps réel. Hidnseek a mis au point un tracker solaire à cellules photovoltaïques qui offre une puissance et une connectivité illimitées.

Accélérer l'industrie 4.0

- **Suivi de conteneurs intelligent au sein du Groupe PSA** – La solution « Track&Trace » assure la digitalisation du suivi des emballages (conteneurs) entre les fournisseurs et les usines de montage de PSA. Cette solution, basée sur l'offre Internet des Objets d'IBM et le réseau international OG de Sigfox, permet au Groupe PSA d'optimiser la rotation des conteneurs entre les différents sites de ses fournisseurs et ses usines. Le but étant de diminuer les ruptures de lignes de production et éradiquer les pertes d'emballages, et ainsi prévenir les incidents.
- **Remorques connectées pour les clients de Total** – Total, via sa filiale Stela, et Sigfox ont déployé une solution dédiée à l'optimisation du matériel roulant, incluant la gestion des parcs de remorques. Pensée pour les transporteurs (par les transporteurs), la solution intitulée « Où est ma remorque » permet d'optimiser l'utilisation et la sécurisation des parcs de remorques.
- **Cuves connectées pour l'industrie pétrolière et gazière** – En fournissant des informations en temps quasi réel sur le niveau des cuves, la télésurveillance permet aux fournisseurs de gaz de parer aux pénuries et livraisons en urgence, d'améliorer la planification des ressources et d'optimiser les acheminements. L'équipement de surveillance traditionnel est basé sur des réseaux cellulaires ; en intégrant Sigfox, la nouvelle solution réduira le coût de l'équipement, allégera la maintenance grâce à la grande autonomie de la batterie et diminuera les frais de communication. À terme, elle aidera les fournisseurs de gaz à réduire leurs coûts de distribution et à fournir de meilleurs services à leurs clients.
- **Sigfox à la pointe de l'IoT industriel avec Airbus** – Airbus a choisi d'utiliser le réseau Sigfox via la solution de Sens lus STICKNTRACK pour optimiser la chaîne d'approvisionnement. Airbus pourra désormais garder une trace en temps réel de ses pièces de rechange et les localiser partout dans le monde. L'équipement de

suivi peut constituer un véritable défi pour l'entreprise, car les actifs transitent entre différents entrepôts et sont stockés sur un grand site de production. STICKNTRACK améliorera de manière significative la gestion de la chaîne d'approvisionnement d'Airbus en permettant à l'entreprise de faire face à des événements inattendus, tels que des retards de livraison ou des pertes, en temps opportun.

Rendre la vie quotidienne plus intelligente

- **Tracker de bagage innovant avec Louis Vuitton Horizon** – LVMH a choisi d'utiliser le réseau Sigfox via sa solution Monarch. Exclusivement disponible avec la gamme de valises Louis Vuitton Horizon, elle permet aux passagers de suivre leurs bagages dans les principaux aéroports, même en voyageant entre différents pays, en reconnaissant automatiquement et en s'adaptant aux normes locales de radiofréquence. Le tracker à bagages peut facilement être clipsé dans une poche dans la valise. Extrêmement facile à utiliser, sa faible consommation d'énergie assure une autonomie de six mois.
- **Domotique** – SMOCKEO est un détecteur de fumée connecté, doté de fonctions avancées de prévention, d'assistance et de statistiques. Il démontre les avantages concurrentiels de la connectivité Sigfox: une très grande autonomie de la batterie et une solution qui ne nécessite pas de connectivité Internet locale. L'objet se connecte au réseau dès que la batterie est insérée.
- **Bouton connecté universel** – Le BT.TN mis au point par une entreprise finlandaise est l'interface utilisateur Internet la plus simple du monde. Il s'agit d'un bouton d'alerte connecté capable d'envoyer des messages, de contrôler d'autres appareils connectés, de commander de la nourriture ou des services, de déclencher des processus métier, etc. Avec l'imagination comme seule limite, il permet de transformer n'importe quelle activité en véritable service à la demande.

Faire progresser les soins et l'assistance de vie

- **Assistance à l'autonomie** – Z#BRE propose un boîtier d'assistance à l'autonomie connecté pour les seniors qui permet au personnel des municipalités, des compagnies d'assurance et des services

sociaux de surveiller les services et soins dispensés au domicile des personnes âgées. Le boîtier, appelé Z#LINK, garantit la distribution des médicaments et des repas, et veille à ce que les soins de santé soient prodigués selon le calendrier prévu. De plus, il prévient les personnes compétentes lorsqu'un capteur thermique intégré détecte d'importants changements de température.

- **Détecteurs de chute** – CO-ASSIST a mis au point une montre pour les seniors et les personnes handicapées qui peuvent avoir besoin d'assistance en cas de chute ou de désorientation. Elle déclenche automatiquement une alerte en cas de chute, et est équipée d'un bouton d'alarme et d'un GPS pour géolocaliser l'alerte et la personne.
- **Défibrillateurs connectés** – Comme les défibrillateurs se trouvent souvent dans des endroits éloignés, il est difficile d'effectuer des autotests réguliers pour vérifier leur bon fonctionnement. Les clients qui possèdent plusieurs défibrillateurs (notamment les entreprises) veulent centraliser leur supervision. AIVIA présente un défibrillateur connecté qui envoie des informations de surveillance sur le statut de la porte (ouverte / fermée), le statut du défibrillateur (OK / Pas OK) et réalise un autotest quotidien et un test de la batterie.

Améliorer la sécurité des individus

- **Données instantanées sur la qualité et la température de l'eau de la piscine** – RIIOT LABS et son analyseur de piscine intelligent indiquent à l'utilisateur en temps réel s'il peut faire un plongeon dans sa piscine. Le capteur mesure en permanence les paramètres clés des piscines, tels que la température, le pH et les niveaux de chlore ou de salinité. Les données sont analysées et communiquées instantanément à l'utilisateur via une application mobile ou aux personnes chargées de l'entretien de la piscine par le biais de notifications.
- **Bornes incendie connectées** – TALIS est l'un des principaux fournisseurs mondiaux de vannes, bornes incendie et autres solutions haut de gamme pour contrôler le débit de l'eau. Ce groupe allemand présente Copernic, une solution qui permet aux compagnies des eaux et à leurs agents de surveiller l'état de milliers de poteaux

incendie 24 heures sur 24, 7 jours sur 7 pour garantir un fonctionnement correct et prévenir le vol d'eau. La solution déclenche des alertes en temps réel lorsque les poteaux incendie sont utilisés et fournit des estimations du volume tiré, des données sur le fonctionnement des poteaux et d'autres informations permettant d'optimiser l'efficacité du réseau.

3. Principes techniques

3.1. Ultra-Narrow band (UNB)

Sigfox utilise une bande de fréquences de 192 kHz au sein de la bande ISM (Industriel, Scientifique et médical). Chaque trame est transmise avec un débit de 100 bits par seconde (zone EMEA Europe Middle East Africa) sur une bande de 100 Hz, en utilisant une modulation DBPSK (Differential Binary Phase Shift Keying).

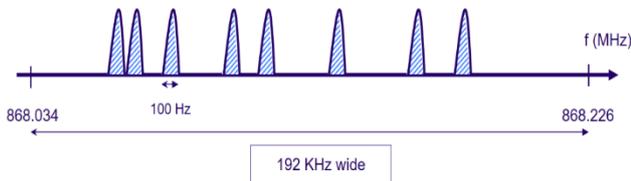


Figure 4 : bande Sigfox sur la zone EMEA

Combiné à une forte sensibilité de réception des stations de base Sigfox, le bilan de liaison total atteint les 162 dB.

En plus d'accepter une forte densité d'objets par station de base, la technologie Ultra Narrow Band possède une forte résistance aux interférences, qualité importante pour effectuer de la transmission sur des fréquences libres.

La configuration radio choisie en Europe est 868 MHz, +14 dBm.

3.2. Accès aléatoire

La transmission entre les objets et les stations de base est non synchrone. L'absence de synchronisation permet aux objets de transmettre leurs données sans la nécessité d'une négociation protocolaire avec le réseau, et ainsi d'optimiser la consommation de la batterie. Chaque message Sigfox est transmis sur une fréquence aléatoire et répétée sur 2 autres fréquences. Cette méthode permet d'atteindre une haute qualité de service.

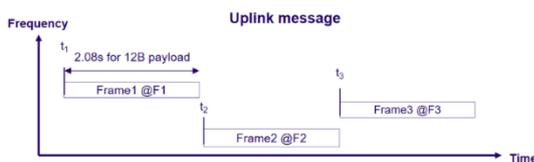


Figure 5 : transmission d'un message sur 3 fréquences

3.3. Contenu des messages

Chaque message Sigfox peut contenir entre 0 et 12 octets de données utiles. Sigfox a défini un protocole de communication pour de petites quantités de données afin de satisfaire aux contraintes d'autonomie et de coût des objets sur le réseau. Un message de 12 octets peut contenir l'information de plusieurs capteurs, comme cela est présenté dans les exemples ci-dessous :

- coordonnées GPS : 6 octets
- température / vitesse : 1 à 2 octets
- état d'un objet : 0 à 1 octet

L'offre commerciale de Sigfox permet de transmettre jusqu'à 140 messages par jour en « uplink ». Les messages « downlink » ont une taille fixe de 8 octets permettant entre autres de modifier les paramètres d'un objet, de déclencher une action...

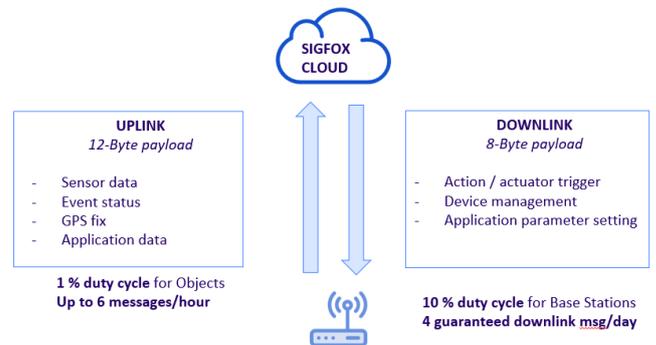


Figure 6 : petits messages pour répondre aux contraintes de coût et d'autonomie énergétique des objets distants

3.4. Faible susceptibilité aux interférences

Sigfox est adapté à une utilisation dans le domaine fréquentiel public grâce à ses capacités anti-brouillage liées à la robustesse intrinsèque de l'UNB associée à la dispersion spatiale des stations de base.

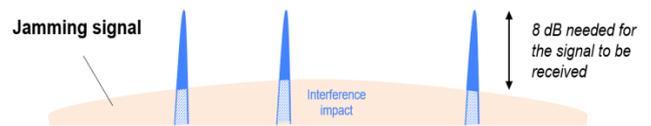


Figure 7 : illustration de la capacité anti-brouillage

Pour les mêmes raisons techniques, l'UNB est extrêmement robuste dans un environnement avec d'autres signaux présents sur un large spectre. Cependant, les réseaux évoluant sur un large spectre sont affectés par les signaux UNB. Ultra Narrow Band est donc le meilleur choix pour opérer dans la bande publique ISM.

3.5. Très longue portée

La très longue portée offre une couverture nationale pour un coût minimum. Pour une puissance de sortie donnée, la plage de la liaison RF est déterminée par le

débit de données : plus le débit est faible et plus la portée sera longue.

Le deuxième facteur est la qualité de la liaison, due à la fois à la sensibilité de la station de base et à la puissance de sortie de l'objet. Bien évidemment, la portée dépend aussi beaucoup de la topographie du lieu. Notons également ici la bonne couverture en intérieur en raison de l'utilisation de la bande SUB-GHz.

	Modulation	Data-rate (bps)	Tx Power	Compound TX Antenna Gain	Compound RX Antenna Gain	RX sensitivity	Link Budget
Uplink (ETSI)	BPSK	100	+14 dBm	0dB	+6dB	-142dBm	+162dB
Downlink (ETSI)	GFSK	600	+27 dBm	+6dB	0dB	-130dBm	+163dB
Uplink (FCC)	BPSK	600	+22 dBm	0dB	0dB	-134 dBm	+156dB
Downlink (FCC)	GFSK	600	+30 dBm	0dB	0dB	-129 dBm	+159dB

Noise Power = $k.T.B = -174 + 10.\log(BW)$
 4dB NF & min SNR of 8 dB => sensitivity = $-174+20+4+8 = -142$ dBm

Figure 8 : caractéristiques de la transmission

3.6. Modulation

Modulation « uplink » : modulation différentielle BPSK :

- Modulation de phase : 0 → changement de phase (*rotation de π*), 1 → pas de changement de phase
- modulation d'amplitude complémentaire : évolution en rampe montante et descendante de l'amplitude du signal à chaque changement de phase pour réduire l'occupation de spectre.

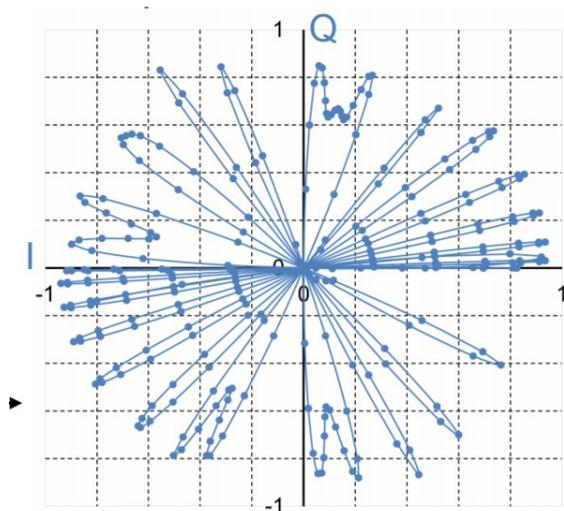


Figure 9 : dérive de fréquence en modulation « BPSK »

- Modulation « downlink » : la modulation de type « GFSK » est utilisée. On la retrouve dans de nombreux standards : DECT, Bluetooth, ... Elle est basée sur la modification des impulsions : utilisation de filtres gaussiens pour lisser les transitions.

4. Matériels

Sigfox n'est pas un fabricant de matériels. Il s'approvisionne chez de nombreux partenaires du monde du semi-conducteur.

Les kits de développement Sigfox sont le moyen le plus simple à mettre en œuvre pour concevoir sa première application. Ils sont disponibles auprès de plusieurs partenaires avec une année de connexion au réseau.

Exemples de kits : Arduino, Wisol by Yadom.fr, Sipy (Pycom.io), Unashield (Unabiz)... Liste sur <https://partners.sigfox.com/products/kit>.

5. Partenariats universités/écoles et ressources

- partenariats avec universités et écoles : <https://www.sigfox.com/en/partnerships>,
- liste des matériels et solutions Sigfox : <http://partners.sigfox.com>
- ressources matérielles : <http://build.sigfox.com>
- forum: <http://ask.sigfox.com>
- communauté de « makers » Sigfox : <http://sigfoxbuilders.herokuapp.com>
- projets de « makers » : <https://www.hackster.io/sigfox>

Perturbations engendrées sur les réseaux par les fours à arc alternatifs

JACQUES COURAULT

Résumé : un four à arc, souvent de forte puissance, est un gros perturbateur pour les réseaux : consommation fluctuante de puissance réactive et courts-circuits monophasés sont fréquents. Dans cet article, après un rappel du comportement du réseau face à des perturbations équilibrées, puis déséquilibrées, nous verrons quelques solutions pour absorber, filtrer, compenser ces perturbations.

Mots clés : réseaux, fours à arc, perturbations, absorbeur, filtrage, compensation, harmoniques, flicker, PST

1. Introduction

Il est bien évident qu'un four à arc, le plus souvent de forte puissance, est un gros perturbateur pour les réseaux : consommation fluctuante de puissance réactive et courts-circuits monophasés fréquents. Ces perturbations sur les réseaux sont d'autant plus importantes que les puissances de court-circuit sont faibles.

La figure (1) montre de manière simpliste le fonctionnement, d'un point de vue électrique, d'un four à arc.

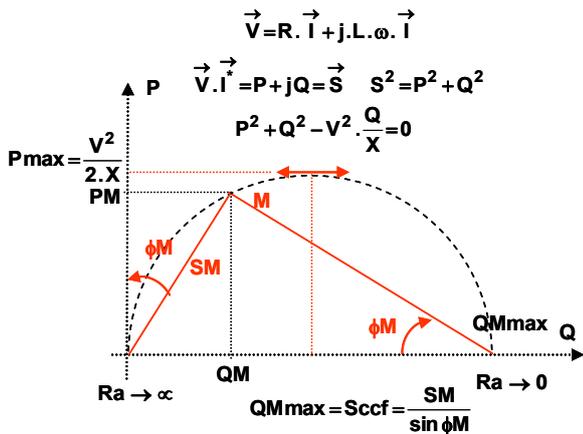


Figure 1 : Diagramme P, Q d'un four

R représente l'ensemble des résistances, Ra résistance de l'arc, Rl résistance des câbles de liaison, Rt résistance qui représente les pertes dans les enroulements du transformateur et Rr résistance du réseau, ces résistances étant ramenées au secondaire du transformateur de four.

L représente l'ensemble des inductances, La inductance de l'arc, Ll inductance des câbles de liaison, Lt inductance de de fuite du transformateur et Lr inductance du réseau, ces inductances étant ramenées au secondaire du transformateur de four.

I est le courant d'arc et V la tension simple du réseau (Scf → ∞)

M est le point de fonctionnement nominal du four, il est caractérisé par PM, puissance active nominale et QM puissance réactive nominale, grandeurs qui définissent

l'angle de fonctionnement Φ , avec $\tan \Phi M = \frac{QM}{PM}$ ou $\cos \Phi M = \frac{PM}{SM}$. P = f(Q) est représentée par un demi-cercle. La puissance de court-circuit $QMmax = Scsf = \frac{SM}{\sin \Phi M}$ donne la variation de puissance réactive maximale qui perturbe le réseau...

Sur un four à courant alternatif le réglage de la puissance s'effectue en jouant sur la tension. Une vingtaine de plots, généralement sur le primaire, permettent le choix du point de fonctionnement. Il existe donc, pour un four donné, un grand nombre de cercles P = f(Q).

Un schéma de principe est donné figure (2). C'est un composant complexe du fait de ses fonctions et des contraintes associées, forts courants, courts-circuits fréquents et surtensions dues aux ruptures des arcs. Ces contraintes nécessitent un suivi fréquent de la qualité de l'huile de refroidissement.

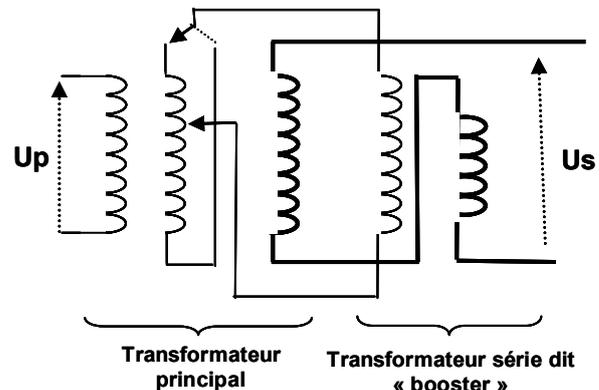


Figure 2 : Schéma de principe possible d'un transformateur d'alimentation d'un four à arc

En plus du réglage évoqué, on trouve assez souvent des transformateurs de four dans lesquels le secondaire (fort courant) peut être couplé en triangle ou en étoile (commutation hors tension), ce qui n'est pas sans conséquence sur la perception des courts-circuits vue du réseau.

2. Perturbations sur le réseau

2.1. Comportement du réseau face à des perturbations équilibrées.

Sur les fours à arc, ce régime de fonctionnement n'est observé qu'en fin de fusion ou en affinage. La figure (3) concerne une phase, les trois phases sont supposées être équilibrées.

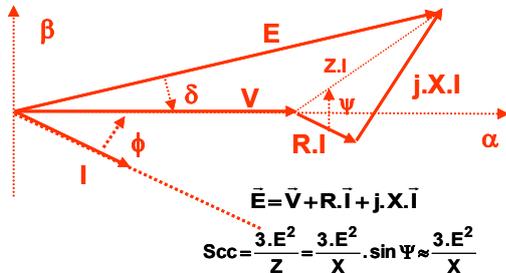


Figure 3 : Fonctionnement équilibré

En projetant sur les axes α et β nous obtenons :

$$\begin{cases} E \cdot \cos \delta = V + R \cdot I \cdot \cos \varphi + X \cdot I \cdot \sin \varphi \\ E \cdot \sin \delta = -R \cdot I \cdot \sin \varphi + X \cdot I \cdot \cos \varphi \end{cases}$$

Ces deux équations peuvent être élevées au carré et additionnées

$$E^2 = V^2 + R^2 \cdot I^2 + X^2 \cdot I^2 + 2 \cdot V \cdot (R \cdot I \cdot \cos \varphi + X \cdot I \cdot \sin \varphi)$$

$$E^2 = V^2 + R^2 \cdot I^2 + X^2 \cdot I^2 + 2 \cdot V \cdot R \cdot I \cdot \cos \varphi + 2 \cdot V \cdot X \cdot I \cdot \sin \varphi$$

On pose $\frac{V}{E} = v$, $\frac{R \cdot I}{E} = r$, $\frac{X \cdot I}{E} = x$

$$1 = v^2 + r^2 + x^2 + 2 \cdot v \cdot r \cdot \cos \varphi + 2 \cdot v \cdot x \cdot \sin \varphi$$

Posons $\Delta v = 1 - v = \frac{E - V}{E}$ $v = 1 - \Delta v$

$$0 = (\Delta v)^2 - 2 \cdot \Delta v \cdot (1 + r \cdot \cos \varphi + x \cdot \sin \varphi) + 2 \cdot (r \cdot \cos \varphi + x \cdot \sin \varphi) + r^2 + x^2$$

Cette équation permet de trouver Δv qui est la variation relative de la tension V en fonction de E . La solution est la suivante :

$$\Delta v = (1 + r \cdot \cos \varphi + x \cdot \sin \varphi) - \sqrt{1 - (r \cdot \sin \varphi + x \cdot \cos \varphi)^2}$$

Soit d'une manière simplifiée, avec un développement limité au premier ordre :

$$\Delta v \approx (1 + r \cdot \cos \varphi + x \cdot \sin \varphi) - 1 + \frac{1}{2} \cdot (r \cdot \sin \varphi + x \cdot \cos \varphi)^2$$

$$\Delta v \approx r \cdot \cos \varphi + x \cdot \sin \varphi + \frac{1}{2} \cdot (r \cdot \sin \varphi + x \cdot \cos \varphi)^2$$

En reprenant les notations d'origine :

$$\frac{X}{R} = \frac{x}{r} = \operatorname{tg} \Psi \quad x = \frac{X \cdot I}{E} = \frac{3 \cdot E \cdot I}{S_{cc}}$$

$$x \cdot \cos \varphi = \frac{S \cdot \cos \varphi}{S_{cc}} \approx \frac{P}{S_{cc}} \quad x \cdot \sin \varphi \approx \frac{Q}{S_{cc}}$$

$$\text{et } r \cdot \cos \varphi = \frac{1}{\operatorname{tg} \Psi} \cdot \frac{P}{S_{cc}} \quad \text{et } r \cdot \sin \varphi = \frac{1}{\operatorname{tg} \Psi} \cdot \frac{Q}{S_{cc}}$$

Nous arrivons finalement à la formule suivante bien connue :

$$\Delta v \approx \frac{1}{S_{cc}} \cdot \left(Q + \frac{P}{\operatorname{tg} \Psi} \right) + \frac{1}{2 \cdot S_{cc}^2} \cdot \left(\frac{Q}{\operatorname{tg} \Psi} + P \right)^2 \approx \frac{Q}{S_{cc}} \quad (1)$$

Cette formule très simplifiée a le grand mérite de la synthèse, mais elle est d'autant plus fautive que le réseau est peu inductif. Quand X est faible, voire nulle, $\operatorname{tg} \Psi \rightarrow 0$ et $\Delta v \rightarrow \infty$ ce qui est absurde. Cependant elle est considérée comme satisfaisante lorsque $\operatorname{tg} \Psi > 10$, ce qui est normalement le cas sur la plupart des réseaux de distribution.

En prenant en compte la puissance de court-circuit sous la forme $S_{cc} = \frac{3 \cdot E^2}{X} \cdot \sin \Psi$, on arrive à :

$$\Delta v \approx \frac{P \cdot \cos \Psi + Q \cdot \sin \Psi}{S_{cc}} + \frac{1}{2 \cdot S_{cc}^2} \cdot (P \cdot \sin \Psi + Q \cdot \cos \Psi)^2 \quad (2)$$

où le réseau d'alimentation est mieux pris en compte, mais de manière moins synthétique.

2.2. Comportement du réseau face à des perturbations déséquilibrées

Dans le cycle de fonctionnement d'un four à arc il excite des phases de fonctionnement dans lesquelles les courts-circuits monophasés sont fréquents ; phase d'amorçage et pendant la formation des puits du fait des éboulements... Ces courts-circuits sont importants, ils sont liés à la puissance de court-circuit du four, ils sont à l'origine de perturbations importantes pour le réseau d'alimentation, ils sont compensés par un dispositif dynamique et statique, STATOCOMPENSATEUR ou STATCOM. Le dimensionnement du dispositif de compensation doit tenir compte de ces fonctionnements monophasés.

Ces fonctionnements monophasés ont pour origine le four, c'est donc au secondaire du transformateur qu'ils se produisent. Le couplage du transformateur a donc une incidence sur les courants absorbés au réseau. Si le couplage du primaire est le plus souvent en étoile (ce qui favorise la mise en œuvre du régleur, le secondaire, suivant les installations, peut être étoile ou triangle voire étoile et triangle pour exploiter au mieux les caractéristiques de l'arc.

2.2.1. Couplage étoile / triangle

$$\begin{cases} I_{s1} = J_1 - J_3 \\ I_{s2} = J_2 - J_1 = -I_{s1} = J_3 - J_1 \\ I_{s3} = J_3 - J_2 = 0 \Rightarrow J_2 = J_3 \end{cases}$$

$$J_1 + J_2 + J_3 = 0 \Rightarrow J_1 + 2 \cdot J_3 = 0 \Rightarrow J_3 = -\frac{1}{2} J_1$$

$$J_1 = \frac{2 \cdot I_{s1}}{3} \quad J_2 = -\frac{I_{s1}}{3} \quad J_3 = -\frac{I_{s1}}{3}$$

$$n = \frac{N_2}{N_1} = \frac{U_s}{V_p} = \frac{U_s}{U_p} \cdot \sqrt{3}$$

$$I_{p1} = n \cdot J_1 \quad , \quad I_{p2} = n \cdot J_2 \quad , \quad I_{p3} = n \cdot J_3$$

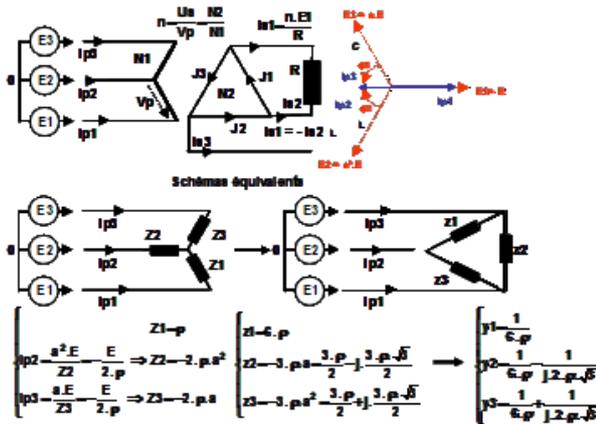


Figure 4 : Fonctionnement monophasé étoile / triangle

On pose :

$$\rho = \frac{3.R}{2.n^2}$$

$$\begin{cases} Ip1 = Id + Ii = \frac{E}{\rho} \\ Ip2 = a^2 . Id + a . Ii = -\frac{E}{2.\rho} \\ Ip3 = a . Id + a^2 . Ii = -\frac{E}{2.\rho} \end{cases}$$

$$Id = Ii = \frac{E}{2.\rho}$$

La transformation série / parallèle permet de constater simplement que le déséquilibre est uniquement dû à du réactif. Cela permet d'envisager une compensation évidente. Entre les phases 1 et 3, la compensation est inductive, entre les phases 2 et 3, elle est capacitive.

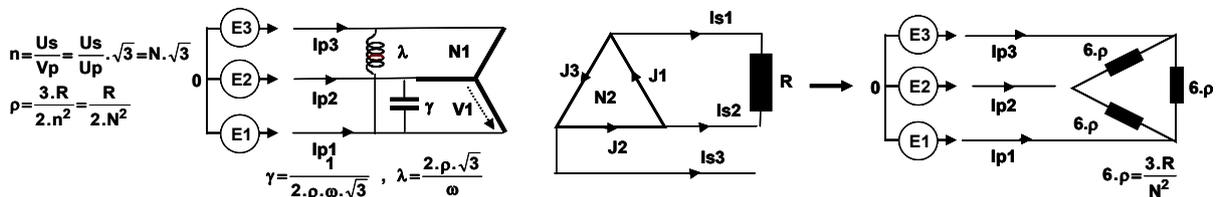


Figure 5 : Compensation du fonctionnement monophasé avec un couplage étoile triangle

2.2.1. Couplage étoile / étoile

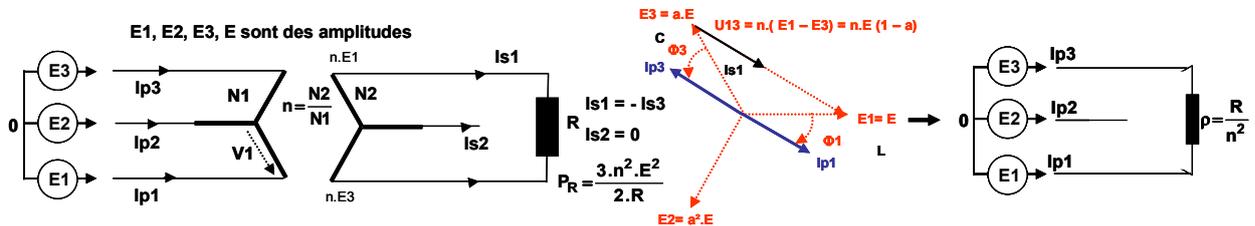


Figure 6 : Fonctionnement monophasé étoile / étoile

La lecture du schéma de la figure 6 nous permet d'écrire :

$$\begin{cases} Ip1 = n . Is1 , Ip2 = n . Is2 , Ip3 = n . Is3 \\ Ip1 = n . Is1 , Ip2 = 0 , Ip3 = -n . Is1 \end{cases}$$

On en déduit :

$$Ip1 = \frac{n^2 . E . \sqrt{3}}{R} . e^{j.\frac{11.\pi}{6}} = \frac{n^2 . E}{R} . (1-a)$$

$$Ip3 = \frac{n^2 . E . \sqrt{3}}{R} . e^{j.\frac{5.\pi}{6}} = -\frac{n^2 . E}{R} . (1-a)$$

Il est facile d'en déduire les composantes symétriques du système :

$$\begin{cases} Ip1 = Id + Ii = \frac{n^2 . E}{R} . (1-a) \\ Ip2 = a^2 . Id + a . Ii = 0 \rightarrow Ii = -a . Id \\ Ip3 = a . Id + a^2 . Ii = -\frac{n^2 . E}{R} . (1-a) \end{cases}$$

$$a . Id - Id = Ip3$$

$$Id = \frac{Ip3}{a-1} = \frac{n^2 . E}{R} \text{ et } Ii = -a . \frac{n^2 . E}{R}$$

Le rééquilibrage est classique, il fait appel à un schéma bien connu dû à Steinmetz (1865 – 1923)

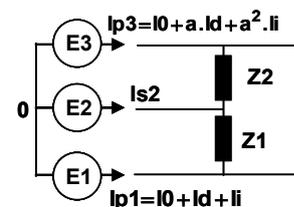


Figure 7 : Schéma de Steinmetz

Pour le schéma de rééquilibrage nous pouvons écrire :

$$\begin{cases} I_{p1} = I_d + I_i = \frac{E_1 - E_2}{Z_1} = \frac{E}{Z_1} \cdot (1 - a^2) \\ \Rightarrow I_d = \frac{E}{Z_1} \cdot (1 - a^2) - I_i \\ I_{p3} = a \cdot I_d + a^2 \cdot I_i = \frac{E_3 - E_2}{Z_2} \cdot (a - a^2) = \frac{a \cdot E}{Z_2} \cdot (1 - a) \\ \text{d'où } I_i = -\frac{E}{a} \cdot \left(\frac{1}{Z_1} + \frac{a}{Z_2} \right), \quad I_d = E \cdot \left(\frac{1}{Z_1} + \frac{1}{Z_2} \right) \end{cases}$$

Pour obtenir les valeurs $Z_1 = j \cdot X_1$ et $Z_2 = j \cdot X_2$, il suffit d'écrire que la composante inverse du schéma sans compensation est égale à l'inverse de la composante inverse du dispositif de compensation :

$$\begin{aligned} \text{En posant } \rho &= \frac{R}{n^2} \quad a \cdot \frac{1}{\rho} = -\frac{1}{a} \cdot \left(\frac{1}{Z_1} + \frac{a}{Z_2} \right) \\ \frac{a^2}{\rho} &= -\frac{1}{Z_1} - \frac{a}{Z_2} \Rightarrow \frac{a^2}{\rho} = j \cdot \frac{1}{X_1} + j \cdot \frac{a}{X_2} \\ \Rightarrow \frac{-\frac{1}{2} - j \cdot \frac{\sqrt{3}}{2}}{\rho} &= j \cdot \frac{1}{X_1} + j \cdot \frac{-\frac{1}{2} + j \cdot \frac{\sqrt{3}}{2}}{X_2} \\ &= -\frac{\sqrt{3}}{2 \cdot X_2} + j \cdot \left(\frac{1}{X_1} - \frac{1}{2 \cdot X_2} \right) \\ \rho &= \frac{X_2}{\sqrt{3}} \Rightarrow X_2 = \rho \cdot \sqrt{3} \\ \rightarrow \lambda &= \frac{\varphi \cdot \sqrt{3}}{\omega} = \frac{R \cdot \sqrt{3}}{\omega \cdot n^2} \\ \frac{1}{X_1} &= -\frac{\sqrt{3}}{2 \cdot \rho} + \frac{1}{2 \cdot \rho \cdot \sqrt{3}} \Rightarrow X_1 = -\rho \cdot \sqrt{3} \\ \rightarrow \gamma &= \frac{1}{\rho \cdot \omega \cdot \sqrt{3}} = \frac{n^2}{R \cdot \omega \cdot \sqrt{3}} \end{aligned}$$

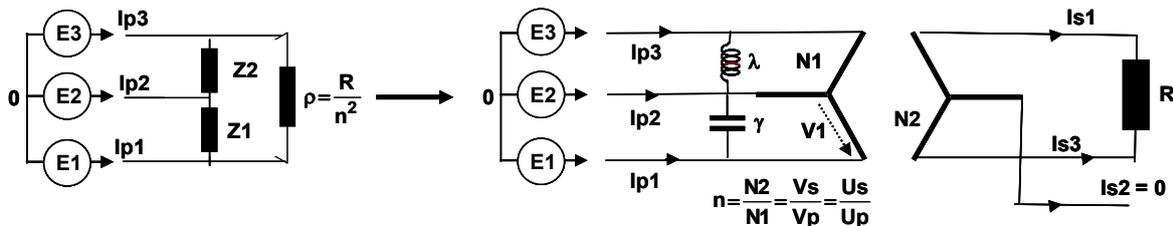


Figure 8 : Rééquilibrage

Pour être synthétique considérons que les puissances soient les mêmes. Dans les deux cas étoile et triangle $P = U^2 / 2 \cdot R$ et N identique

$$\begin{aligned} \lambda_{\text{étoile}} &= \frac{R \cdot \sqrt{3}}{\omega \cdot n^2} = \frac{R \cdot \sqrt{3}}{\omega \cdot N^2} & \lambda_{\text{triangle}} &= \frac{2 \cdot \rho \cdot \sqrt{3}}{\omega} = \frac{R \cdot \sqrt{3}}{\omega \cdot N^2} \\ \gamma_{\text{étoile}} &= \frac{n^2}{R \cdot \omega \cdot \sqrt{3}} = \frac{N^2}{R \cdot \omega \cdot \sqrt{3}} & \gamma_{\text{triangle}} &= \frac{1}{2 \cdot \rho \cdot \omega \cdot \sqrt{3}} = \frac{N^2}{R \cdot \omega \cdot \sqrt{3}} \end{aligned}$$

2.1. Ensemble des perturbations, en terme de puissance réactive

Nous faisons le choix, pour un fonctionnement donné, d'exprimer la puissance réactive en fonction de la puissance réactive de court-circuit du four Sc_{cf} , cette grandeur étant liée à la tension et aux réactances : transformateur et câbles, la puissance de court-circuit du réseau est négligée, car toujours supérieure à environ deux cents fois Sc_{cf} (voir figure 10)

Le besoin de compensation le plus important correspond au cas du court-circuit monophasé, il est égal globalement à $Q_{4ct} = \frac{3 \cdot Sc_{cf}}{4}$ puisque ce court-circuit peut se produire entre n'importe quelles phases.

Q_{4c} répond par excès à l'ensemble des besoins. « La bonne valeur » toujours plus faible est adaptée par un absorbeur inductif en parallèle sur chaque condensateur.

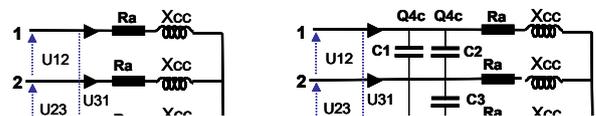


Figure 9 : Compensation

Si nous souhaitons annuler, ou réduire, la puissance réactive de l'un des condensateurs il suffit de mettre en parallèle avec ledit condensateur une charge inductive de puissance identique. Si nous souhaitons changer le signe de la puissance du condensateur, qu'il devienne une inductance il suffit d'augmenter l'importance de la puissance inductive. C'est bien le rôle de l'absorbeur.

Type de fonctionnement	Schéma	Compensation entre 2 phases	Compensation entre 3 phases
Compensation en fonctionnement normal Arbitrairement $\cos \varphi = \frac{\sqrt{2}}{2}$		$Q1c = \frac{Sccf}{6}$	$Q1ct = \frac{Sccf}{2}$
Compensation en fonctionnement court-circuit triphasé		$Q2c = \frac{Sccf}{3}$	$Q2ct = Sccf$
Compensation en fonctionnement sur deux électrodes		$Q3c = \frac{Sccf}{4}$	$Q3ct = \frac{3 \cdot Sccf}{4}$
Compensation en court-circuit sur deux électrodes		$Q4c = \frac{Sccf}{2}$	$Q4ct = \frac{3 \cdot Sccf}{2}$
Rééquilibrage Stenmetz		$Q5c = \frac{Sccf}{4 \cdot \sqrt{3}}$	$Q5ct = \frac{Sccf \cdot \sqrt{3}}{4}$

Figure 10 : Consommations de puissance réactive

Pour réaliser le schéma de Steinmetz, dans le cas d'un fonctionnement sur les phases 1 et 2 :

- C1 doit se comporter comme une inductance : $X1 = R \cdot \sqrt{3}$
- C2 doit compenser le réactif de la charge monophasée, ce qui est réalisé par excès avec : $Q4c = \frac{Sccf}{2}$
- C3 doit être un condensateur : $X2 = -R \cdot \sqrt{3}$

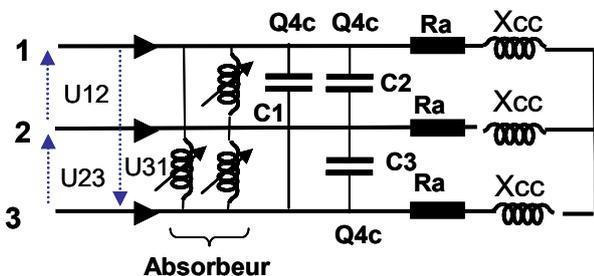


Figure 11 : Compensation et absorption

Si nous considérons une phase de l'absorbeur, elle doit avoir une puissance

$$Q_{abs1} = Q4c + \frac{U_{ef}^2}{X1}$$

avec $X1 = R \cdot \sqrt{3} = 2 \cdot \sqrt{3} \cdot Ra \cdot (1 + tg^2 \varphi)$

ceci dans une structure parallèle de la charge, avec

$$tg \varphi = \frac{X_{cc}}{Ra}$$

$$\frac{U_{ef}^2}{X1} = \frac{U_{ef}^2}{2 \cdot \sqrt{3} \cdot Ra \cdot (1 + tg^2 \varphi)} = \frac{Sccf \cdot tg \varphi}{2 \cdot \sqrt{3} \cdot (1 + tg^2 \varphi)}$$

d'où $Q_{abs1} = \frac{Sccf}{2} \cdot \left(1 + \frac{tg \varphi}{\sqrt{3} \cdot (1 + tg^2 \varphi)} \right)$ (3)

si $\varphi = 45^\circ$, $tg \varphi = 1$ et $Q_{abs1} = 0,644 \cdot Sccf$

soit globalement pour les 3 phases

$$Q_{abs} = 1,933 \cdot Sccf$$

3. Absorbeur

Plusieurs solutions sont possibles pour maîtriser la puissance réactive ; pour absorber de la puissance réactive, voire pour en fournir. Les STATCOM (STATic synchronous COMPensator), sont utilisés depuis une petite vingtaine d'années, ils permettent de très bonnes performances dynamiques mais demeurent coûteux (GTO, IGBT ou IEGT). D'où le choix, encore aujourd'hui, d'une solution plus classique, à base de thyristors, le STATOCOMPENSATEUR (SVC, Static Var Compensator).

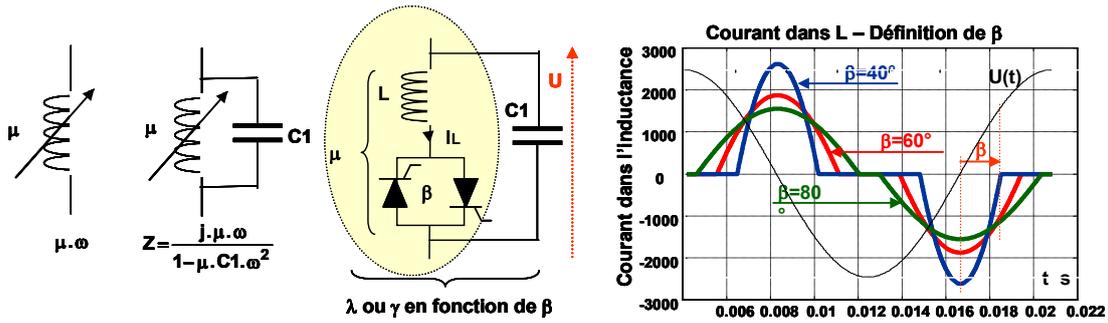


Figure 12 : Principe de l'absorbeur à thyristors

Le courant dans l'inductance L est réglé par la commande des thyristors (angle β), le courant est donc discontinu, ce qui permet un temps de réponse d'une demi-période. En fait, si l'on introduit la notion de retard statistique le temps de réponse est du quart de période. Pour définir correctement l'absorbeur et son actionneur il convient d'évoquer en premier la valeur efficace du fondamental du courant dans L, puis la valeur efficace totale du courant et enfin la valeur moyenne du courant dans un thyristor. Les formules qui suivent définissent les courants en grandeurs réduites.

$$\frac{L \cdot \omega \cdot I_{ef} F}{U_{ef}} = \frac{2 \cdot \beta - \sin 2 \cdot \beta}{\pi}$$

$$\frac{L \cdot \omega \cdot I_{ef} T}{U_{ef}} = \sqrt{\frac{2 \cdot \beta \cdot \cos 2 \cdot \beta - 3 \cdot \sin 2 \cdot \beta + 4 \cdot \beta}{\pi}}$$

$$I_{mothy} = \frac{U_{ef} \cdot \sqrt{2}}{L \cdot \omega} \cdot \frac{\sin \beta - \beta \cdot \cos \beta}{\pi}$$

Il est bien clair que le calcul des puissances réactives est réalisé en partant des courants fondamentaux.

Le courant dans l'inductance L est de la forme :

$$I_{ef} F = \frac{U_{ef}}{L \cdot \omega} \cdot \frac{\pi}{2 \cdot \beta - \sin 2 \cdot \beta} = \frac{U_{ef}}{\mu \cdot \omega} \Rightarrow \mu = L \cdot \frac{\pi}{2 \cdot \beta - \sin 2 \cdot \beta}$$

pour L donné, nous avons bien $\mu = f(\beta)$.

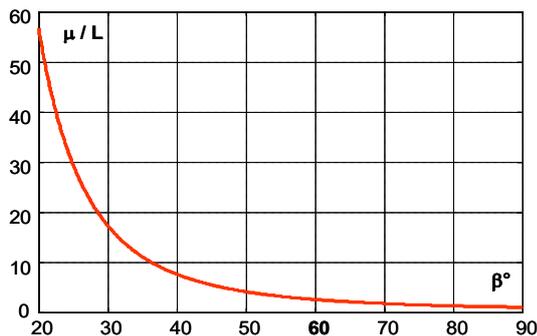


Figure 13 : Variation de μ en fonction de β

En considérant l'ensemble C1 et μ nous avons soit un condensateur équivalent soit une inductance équivalente.

$$Z = \frac{j \cdot \mu \cdot \omega}{1 - \mu \cdot C1 \cdot \omega^2} = \frac{j \cdot \mu \cdot \omega}{1 - \left(\frac{\omega}{\omega\omega}\right)^2} \text{ avec } \omega\omega = \frac{1}{\sqrt{\mu \cdot C1}}$$

- si $\omega\omega > \omega$ alors Z est inductive.
- si $\omega\omega < \omega$ alors Z est capacitive

On en déduit la puissance réactive de Z :

$$Q_z = Q_{C1} \cdot \left(\left(\frac{\omega\omega}{\omega} \right)^2 - 1 \right) \quad (4)$$

Pour fixer les idées prenons un four de 50 MW (70,72 MVA, $\cos \varphi = 0,707$) alimenté, au primaire du transformateur, en 18 kV. Le courant actif est de 1604 A, soit une résistance d'arc ramenée au primaire de 6,48 Ω (chaque électrode régule une impédance) donc en fonctionnement monophasé $R = 12,95 \Omega$ $S_{ccf} = 70,72 \text{ MVA} / 0,707 = 100 \text{ MVA}$

Q_{C1} est Q_{4c} (figure 10),

$$Q_{C1} = \frac{S_{ccf}}{2} = 50 \text{ MVAR}$$

Le bras de l'absorbeur doit avoir une puissance $Q_{abs1} = 0,644 \cdot S_{ccf} = 64,4 \text{ MVAR}$, pour calculer L nous fixons $\beta = 60^\circ$ (justification dans la suite)

Le courant dans L est :

$$I = \frac{Q_{C1}}{U} = 3556 \text{ A}$$

$$L = \frac{U_{ef} \cdot \left(\frac{2 \cdot \beta - \sin 2 \cdot \beta}{\pi} \right)}{I \cdot \omega} = 6,3 \text{ mH}$$

En faisant varier β on fait varier μ . Pour β faible la puissance réactive globale du dispositif est capacitive, pour β fort la puissance réactive globale est inductive.

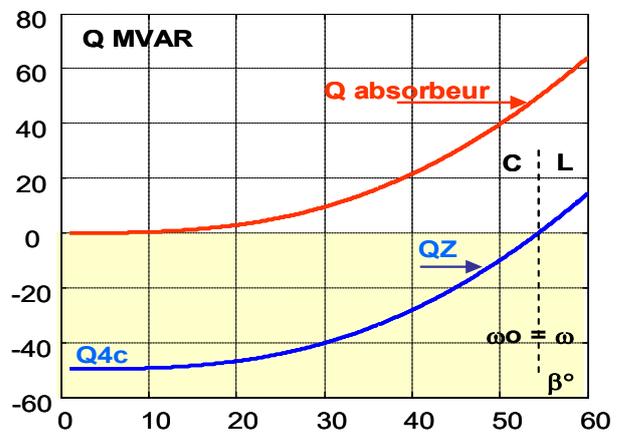


Figure 14 : Passage de capacitif à inductif

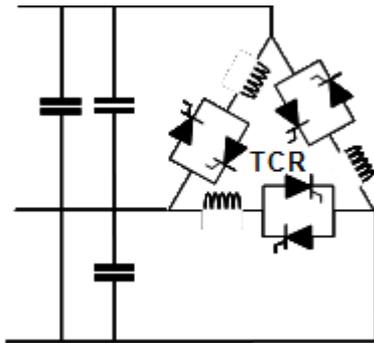


Figure 15 : Schéma triphasé

3.1. Choix de L et de β

Ce choix est relativement polémique pour certains constructeurs, le bon choix est 60°, pour d'autre 90°. Ce qui est certain c'est la puissance souhaitée du TCR. Compte tenu des thyristors, le couple U, I est bien approché. Une fois la tension fixée, le courant devient le paramètre imposé. Le courant maximal est imposé. Il est possible de l'obtenir aussi bien avec β = 60° qu'avec β = 90°. Bien sûr dans les deux cas les inductances sont différentes, ainsi que les pertes dans les thyristors.

I_{efF} est le courant efficace fondamental qui traverse l'inductance L (courant à prendre en compte pour le calcul des puissances réactives).

I_{efT} est la valeur efficace totale du courant qui traverse l'inductance L (prise en compte des harmoniques).

On notera que pour β_{max} = 90° il n'existe plus de variations de tension aux bornes des thyristors, ils conduisent en permanence. Cela entraîne des difficultés de commande, car en moyenne tension, pour des raisons d'isolement, l'énergie d'amorçage des thyristors provient des dV/dt à leurs bornes. Donc avec β_{max} = 90° un dispositif auxiliaire d'alimentation est nécessaire (le plus souvent par un petit transformateur d'alimentation avec une forte isolation entre primaire et secondaire, la commande est optique dans tous les cas). Toutefois ce choix de 90° est pour les SVC, dits de réseaux, qui assurent la stabilité du transport de l'énergie électrique (les finalités de fonctionnement et le dimensionnement de ces appareils n'a rien à voir avec ceux utilisés en distribution).

Soit donc deux angles β₁ et β₂ avec deux inductances L₁ et L₂ pour un même courant I_{efF}

$$I_{efF} = \frac{U_{ef}}{L_1 \cdot \omega \cdot \pi} \cdot (2 \cdot \beta_1 - \sin 2 \cdot \beta_1)$$

$$I_{efF} = \frac{U_{ef}}{L_2 \cdot \omega \cdot \pi} \cdot (2 \cdot \beta_2 - \sin 2 \cdot \beta_2)$$

$$\left(\frac{L_2}{L_1} = \frac{2 \cdot \beta_2 - \sin 2 \cdot \beta_2}{2 \cdot \beta_1 - \sin 2 \cdot \beta_1} \right)_{I_{efF} = Cte}$$

Le coût d'une inductance est sensiblement proportionnel à son L.I², I étant bien sur le courant efficace total I_{efT}.

$$\frac{L_1 \cdot I_{efT}^2}{L_2 \cdot I_{efT}^2} = \frac{L_2}{L_1} \cdot \frac{2 \cdot \beta_1 \cdot \cos 2 \cdot \beta_1 - 3 \cdot \sin 2 \cdot \beta_1 + 4 \cdot \beta_1}{2 \cdot \beta_2 \cdot \cos 2 \cdot \beta_2 - 3 \cdot \sin 2 \cdot \beta_2 + 4 \cdot \beta_2}$$

Pour obtenir un courant efficace fondamental de 3556 A avec β = 85° on calcule L = 14,3 mH

$$d'où \frac{L_2 \cdot I_{efT}^2}{L_1 \cdot I_{efT}^2} = 2,016$$

le choix d'un angle β = 60° conduit donc à un gain significatif sur les inductances. Il convient maintenant de vérifier que ce choix ne conduit pas à un surcoût au niveau des pertes dans les thyristors, car il est bien évident que les courants moyens et efficaces dans les thyristors sont différents.

Dans le cas présent, tous calculs faits, nous obtenons :

- • I_{moy60} = 1402 A
- • I_{moy85} = 1560 A
- • I_{ef60} = 2651 A
- • I_{ef85} = 2518 A

Les pertes calculées, en première approche, sous la forme Pertes = V_o . I_{moy} + r_t . I_{ef}² sont donc sensiblement identiques pour β = 60° et β = 85°. Cela confirme le choix d'un angle de 60°.

4. Autres phénomènes avec effets similaires aux fluctuations de tension.

Tout phénomène affectant à basse fréquence l'amplitude ou le carré ou l'amplitude de la tension est susceptible de perturber les réseaux. C'est le cas des interharmoniques.

Les fours à arc sont connus depuis des années comme la source principale d'interharmoniques ou de sous-harmoniques dont l'origine est dans le procédé lui-même ou dans le contrôle de position des électrodes qui, ni l'un ni l'autre, n'ont de relation de synchronisme avec la fréquence du réseau d'alimentation. Dans la même catégorie on peut évoquer les torches à plasma ou encore les machines à souder ;

4.1. Interharmoniques et flicker

Les dispositifs d'éclairage sont non linéaires. Leur efficacité d'éclairage est fonction du carré de la tension. Les fluctuations de tension produisent des fluctuations d'éclairage nommées scintillement ou papillotement ou flicker dues à des composantes dont les fréquences sont des fréquences de battement : celles-ci peuvent être mises en évidence dans le spectre du carré de la tension.

$$u(t) = U_r \cdot \sin \omega \cdot t + U_p \cdot \sin \omega' \cdot t$$

$$u^2(t) = \frac{U_r^2 + U_p^2}{2} + \frac{1}{2} \cdot (U_r^2 \cdot \cos 2 \cdot \omega \cdot t + U_p^2 \cdot \cos 2 \cdot \omega' \cdot t) + U_r \cdot U_p \cdot (\cos (\omega - \omega') \cdot t - \cos (\omega + \omega') \cdot t)$$

La composante basse fréquence à la pulsation $\omega - \omega'$ est l'origine de flicker

L'évaluation des perturbations engendrées par interharmoniques sur les réseaux, n'est pas facile avec une approche analytique : la démonstration ci-dessus, qui n'en pas vraiment une, ne permet pas d'envisager les dispositifs de compensation. D'où le recours aux statiques basées sur l'expérience acquise avec des installations existantes. Si la tension réseau U_r est parfaitement connue, la tension perturbatrice U_p et sa pulsation ω' ne le sont pas.

5. Caractérisation et normalisation de l'effet des charges fluctuantes

5.1. Phénomènes observés

Les charges fluctuantes sont par, nature, des charges qui fonctionnent à puissance variable : par exemple, un laminoir, une soudeuse et bien sûr un four à arc. Le procédé de conversion de l'énergie peut atténuer les phénomènes de modulation (stockage entre actionneur procédé et réseau) ou l'amplifier. Modulation de la puissance active et surtout de la puissance réactive engendre sur les réseaux des modulations de tension.

Les fluctuations de tension sur les réseaux publics se sont révélés très tôt comme un facteur de gêne important pour les usagers. L'effet de scintillement des lampes d'éclairage était connu au début de la distribution de l'électricité en courant alternatif qui s'effectuait alors en 25 Hz, fréquence qui n'était pas vraiment confortable (en France il a fallu attendre une circulaire du ministère des Transports du 1er août 1918 pour que la fréquence de 50 Hz soit standardisée, comme fréquence « normale »).

L'utilisation d'un réseau public de distribution pour alimenter des charges fluctuantes a conduit à qualifier la gêne qui pouvait en résulter pour le voisinage. Il s'agit du scintillement des lampes d'éclairage que l'usage a nommé flicker par adoption du terme anglais plus concis. La perception du scintillement des lampes d'éclairage ou perception du flicker dépend de l'amplitude et de la fréquence des fluctuations. On a

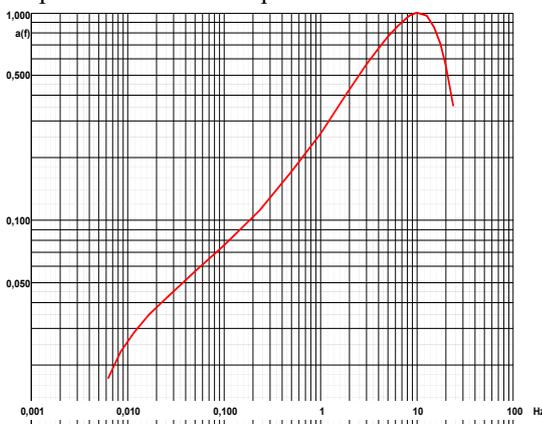


Figure 16 : Sensibilité de l'œil en fonction de la fréquence $a(f)$

commencé à en rendre compte au moyen d'une caractérisation $a(f)$, figure 16, de la sensibilité d'un « œil moyen ». La sensibilité maximale de l'œil étant voisine de 10 Hz, on a défini la fluctuation de tension ΔV_{10} à 10 Hz et établi des fluctuations équivalentes de tension pour des fréquences différentes.

$$\Delta V_{10} = \left(\frac{\Delta V}{V} \right)_{10 \text{ Hz}} \quad \text{et} \quad \Delta V_{10 \text{ équivalent}} = a(f) \cdot \left(\frac{\Delta V}{V} \right)_f$$

La composition de modulations à des fréquences différentes était alors évaluée par une somme quadratique :

$$\Delta V_{10 \text{ équivalent}} = \sqrt{\sum_i \left(a_i \cdot \left(\frac{\Delta V}{V} \right)_{f_i} \right)^2}$$

La caractérisation de l'effet de scintillement a été poursuivie par une évaluation statistique sur une population de volontaires. Le seuil de gêne ressenti par 50 % de la population a permis de tracer les premières caractéristiques de perception associant œil et lampe, fonction du type de lampe (230 V, 120 V, 110 V).

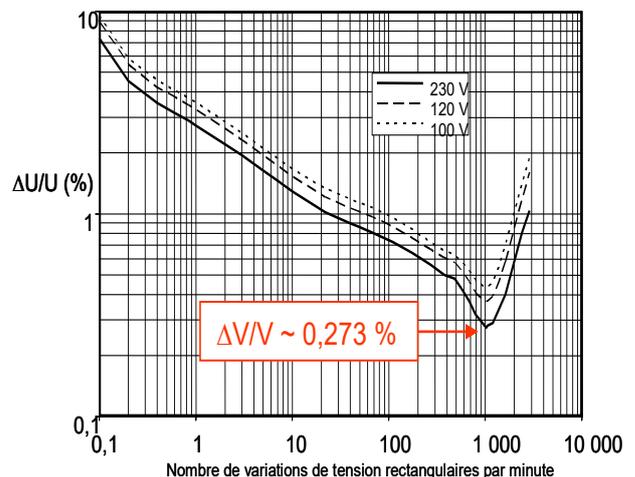


Figure 17 : Niveau de perception du flicker ($Pst=1$)

La figure 17, représente la perceptibilité du scintillement relatif des fluctuations de tension en échelon $\square U/U$, en fonction de l'amplitude des échelons et de leur fréquence (la fréquence correspond au nombre d'échelon par minute). On a déduit de cette caractéristique un indice de perceptibilité du scintillement ou indice de perceptibilité du flicker sur une période courte $Pst = 1$.

5.2. Histoire...

L'unité « *PST* » (Perturbation Short Time) correspond à une durée « Short Time » de 10'. Elle a été définie en 1986 par la norme CEI 868, laquelle a subi un léger amendement en 1990. Elle s'est imposée depuis progressivement en remplaçant les anciennes unités nationales, notamment :

- *Vfg* (%) : unité anglaise signifiant « gauge voltage fluctuation », encore utilisée dans les zones d'influence anglo-saxonne. Son gros défaut est de ne pas inclure de pondération fréquentielle basée

sur la courbe de sensibilité de l'œil. En revanche, les anglais ont été pionniers sur plusieurs points : statistiques expérimentales sur les limites acceptables ; fonction de probabilité cumulée (FPC), avec définition de la référence à 1% (le *PST* parle de valeurs 99% en inversant le point de vue) ; proportionnalité du flicker d'un four AC avec sa puissance de court-circuit (*Sc_{ccf}*). On peut retenir la formule de conversion suivante :

$$PST_{99\%} = 5 \cdot V_{fg} (\%)$$

Par exemple $PST_{99\%} = 1 \Leftrightarrow V_{fg} = 0.2 \%$.

- « dose de flicker » en $(\%)^2 \text{mn}$: unité française qui intègre une pondération fréquentielle de l'œil mais pas de FPC. Cette unité est proportionnelle au carré des fluctuations de tension, c'est-à-dire à la gêne effective de l'œil, tandis que les autres unités sont proportionnelles à la fluctuation de tension, donc à la racine carrée de la gêne. Cette unité n'est plus utilisée.
- $\Delta V_{10}(\%)$: unité japonaise inspirée de l'unité française, mais proportionnelle à la fluctuation de tension, et non pas à son carré. De plus, les niveaux acceptables ont été déterminés par des essais avec des lampes 110 V, utilisées au Japon et aux USA. Or les lampes 110 V produisent moins de flicker que les lampes 220 V, dans un rapport d'environ 1.25, à cause de la plus grande inertie thermique de leur filament. Enfin, la durée d'intégration retenue est d'une minute, au lieu de 10 minutes pour le *PST*, ce qui rend très difficile la comparaison. On peut cependant retenir $Pst = 3 \cdot \Delta V_{10}$ pour les fours AC, et $PST = 3.5 \cdot \Delta V_{10}$ pour les fours DC. La Chine utilisait encore récemment exclusivement l'unité ΔV .
- FGH : unité allemande qui intègre une pondération fréquentielle de l'œil mais pas de FPC. Elle n'est plus utilisée.

L'unité CEI « *PST* » intègre bien sûr la courbe de pondération de l'œil. Mais son progrès décisif réside dans le calcul d'une valeur statistique toutes les 10 minutes, calculée à partir de la valeur issue d'un filtre d'ordre un avec une coupure à 0.3 sec., et fournit une valeur proportionnelle au carré des fluctuations de tension, soit une image de la « gêne instantanée ». Il est effectué un échantillonnage à 500 Hz, puis on calcule la « FPC » sur 10', on effectue ensuite une moyenne pondérée des valeurs correspondant à 5 niveaux de la FPC, et enfin effectue la racine carrée de cette moyenne, pour obtenir un résultat final proportionnel aux fluctuations de tension. Les coefficients de pondération ont été soigneusement déterminés de façon à obtenir un résultat représentatif de la gêne indépendamment du type de charge. A noter que le facteur d'échelle du *PST* a été choisi de façon à obtenir une valeur « per unit » alors que les unités précédentes étaient en %.

Cette unité *PST* représente un réel progrès dans la mesure où elle intègre non seulement la courbe de sensibilité de l'œil, mais aussi une FPC et une moyenne pondérée donnant un résultat indépendant du type de

charge. Cependant, l'algorithme *PST* ne prend pas en compte le type de lampe. En outre, la durée de 10' choisie pour cette valeur « Short Time » nous paraît excessive. En effet, 10' correspond aussi à peu près à la durée d'une période de fusion : il en résulte des valeurs *PST* très dispersées d'une fusion à l'autre, à cause de l'occurrence aléatoire des périodes de calcul par rapport aux périodes de fusion ; une période de calcul de 5', ou 3', serait plus judicieuse. Pour lisser les valeurs *PST*, la norme CEI 868 définit une valeur « Long Time » comme la moyenne cubique des valeurs *PST* sur plusieurs heures, typiquement 2 heures : $PLT = [\sum (PST^3)/N]^{1/3}$, N étant le nombre de valeurs *PST* sur la période. Les valeurs *PLT* peuvent être glissantes, soit alors une valeur *PLT* toutes les 10'. Ces valeurs *PLT* sont de plus en plus utilisées, en particulier par la norme de compatibilité européenne EN50160.

Pour obtenir des résultats répétitifs il faut effectuer une évaluation statistique des valeurs *PST*(10') et *PLT*(2h), sur une période beaucoup plus longue. Cette évaluation statistique n'est pas encore normalisée, mais on recommande une durée d'une semaine, qui correspond à une période d'exploitation universelle, avec les évaluations suivantes :

- $PST_{99\%}$: on supprime 1% des valeurs *PST*(10') les plus grandes, et on retient la plus grande restante. Par exemple, sur une semaine on a 1008 valeurs : on retient la 11ème plus grande.
- $PST_{95\%}$: même principe en remplaçant 1% par 5%. Par exemple, sur une semaine on retient la 51ème plus grande valeur. On a $PST_{95\%} \approx PST_{99\%} / 1.2$.
- $PLT_{99\%}$ et $PLT_{95\%}$: idem, sauf qu'on a moins de valeurs de départ : pour des valeurs de PLT sur 2 heures et non glissantes, on n'a que 84 valeurs par semaine. On utilise surtout $PLT_{95\%}$, avec $PLT_{95\%} \approx PST_{95\%} / 1.25 \approx PST_{99\%} / 1.5$.

L'indice de perceptibilité *PST* est la racine carrée de la somme pondérée de cinq quantiles. Les quantiles 1 % à 50 % sont de préférence lissés. Le symbole des quantiles lissés est affecté de l'indice s.

Le lissage d'un quantile est obtenu par la moyenne arithmétique avec les quantiles voisins. P30 et P80 pour P50 (soit une moyenne sur trois termes).

Cette loi admise par la communauté internationale, suite aux travaux de l'UIE, est décrite par l'équation ci-dessous (voir 4.10.1 de la CEI 61000-4-15), elle représente la sévérité de la forme de la caractéristique de changement de tension.

$$P_{St} = \sqrt{0,0314 \cdot P_{0,1} + 0,0525 \cdot P_{1s} + 0,0657 \cdot P_{3s} + 0,280 \cdot P_{10s} + 0,080 \cdot P_{50s}}$$

En première approche, on peut simplifier cette formule en considérant que les quantités P01, P1, P3, P10 sont proche de la valeur maximale atteinte par la sortie du bloc 4 (notée S4). Par ailleurs, le coefficient associé à P50 est relativement faible. D'où la formulation simplifiée suivante :

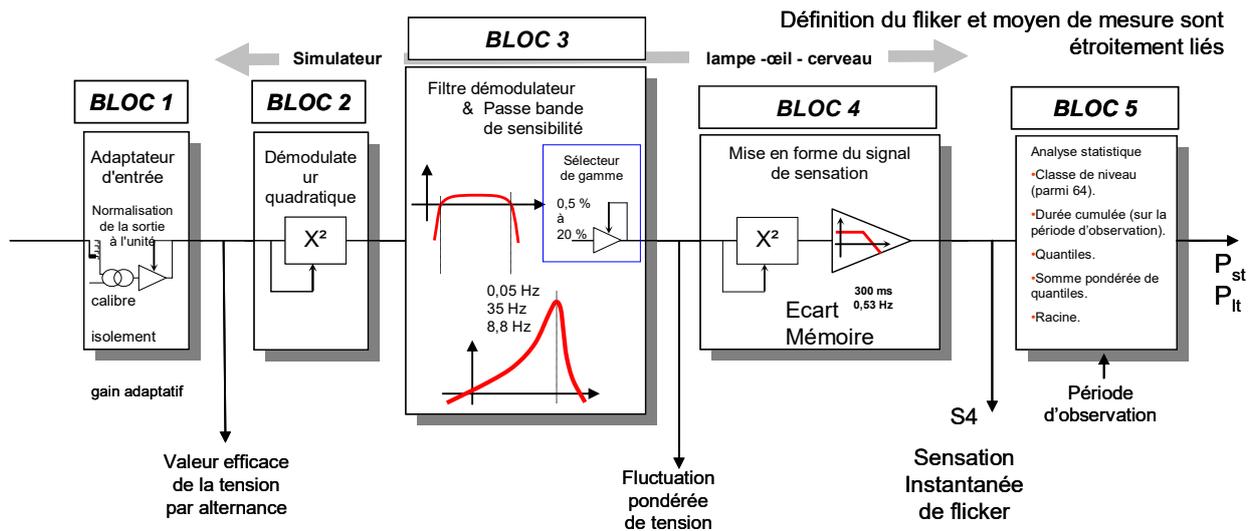


Figure 18 : Schéma de principe du flickermètre international – UIE et CEI 61000-4-15

$$P_{ST} \leq \sqrt{(K_{0,1} + K_1 + K_3 + K_{10} + K_{50}) \cdot S^4}$$

$$P_{ST} \approx 0,714 \cdot \sqrt{S^4}$$

S4 étant la sortie de l'avant dernier module du dispositif normalisé de mesure du P_{ST} , le « flickermètre »

Bloc 1 – Son but est de fournir une tension relative à la tension efficace. Pour réaliser cela il faut d'abord calculer la tension efficace instantanée puis la filtrer avec un passe-bas du premier ordre ($\square = 1$ ms). La sortie du bloc 1 est la tension d'entrée divisée par la tension efficace moyennée.

Bloc 2 – Le rôle de ce bloc est de simuler le comportement de la lampe, en démodulant et en élevant au carré la tension relative. En fait, on se limite à élever au carré. Il restera donc une composante à 100 Hz (réseaux 50 Hz) qui est éliminée par les filtres du bloc 3.

Bloc 3 – Il comprend deux filtres. Le premier élimine la composante continue ainsi que le 100 Hz (réseaux 50 Hz). Le passe haut est du 1er ordre accordé à 0,05 Hz, le passe pas est du 6ème ordre (Butterworth) avec une fréquence de coupure à 35 Hz. Le dernier filtre est un filtre de pondération qui traduit la sensibilité du système lampe/œil pour une lampe remplie de gaz inerte à filament bi-spiralé 60 W, 220 V (des évolutions sont à attendre avec la diffusion des LED).

Bloc 4 – Deux fonctions sont réalisées par ce bloc. Elever au carré le signal pondéré de flicker pour simuler la perception non linéaire de l'ensemble œil/cerveau et lisser le signal pour simuler l'effet de mise en mémoire du cerveau. Le lissage est réalisé avec un passe-bas du premier ordre ($\square = 300$ ms) et un gain de 16 (le gain sera de 1 à 8,8 Hz).

Bloc 5 – Permet l'évaluation statistique en établissant la FPC (fonction de probabilité cumulée). L'échantillonnage doit être supérieur à 500 Hz. L'amplitude du signal de flicker (sortie Bloc 4) doit être subdivisée en un certain nombre de classes (64 au minimum). A chaque classe doit correspondre un compteur qui est incrémenté chaque fois qu'une valeur

échantillonnée est égale ou supérieure au flicker correspondant à la classe. Les compteurs sont ensuite divisés par le nombre total d'échantillons pour obtenir des valeurs en pourcentage. Ainsi on fait correspondre à chaque niveau de flicker le pourcentage de temps pendant lequel il a été dépassé.

5.3. Niveaux de compatibilité et d'émission

Dans son rapport technique 1000-3-7 de 1996 de la CEI, préconise ces limitations suivantes :

	Compatibilité		Planification	
	BT < 1kV	MT	MT	HT > 35kV
PST _{99%}	1	1	0.9	0.8
PLT _{99%}	0.8	0.8	0.7	0.6

Ces limites correspondent à des niveaux de « compatibilité » en BT et MT, et à des niveaux de « planification » en MT et HT, cette différence résultant du fait que les lampes sont toujours raccordées en BT. Rappelons qu'un niveau de « compatibilité » est le niveau d'un réseau que doit pouvoir supporter tout équipement branché sur ce réseau. La « planification » concerne également les réseaux, mais vise un niveau plus faible, pour que la compatibilité soit assurée en tout point du réseau. Par ailleurs, chaque équipement doit engendrer une perturbation inférieure à un niveau dit « d'émission », ce dernier étant lui-même plus faible que le niveau de « planification ». Enfin, le niveau d'« immunité » d'un équipement est celui qu'il est capable de supporter, et qui doit être supérieur au niveau de « compatibilité ». Le niveau d'émission alloué par le fournisseur d'énergie à chaque utilisateur dépend avant tout de la puissance du réseau et de la puissance souscrite par l'utilisateur. S'agissant de flicker, la limite d'émission allouée aux plus gros utilisateurs est souvent égale au niveau de planification, compte tenu de la loi d'addition indiquée ci-dessus : le flicker total est pratiquement égal au flicker de la source la plus perturbatrice.

5.4. Loi d'addition

En présence de plusieurs perturbateurs la loi d'addition du flicker est la suivante :

$$Pst_{total} = (Pst_1^A + Pst_2^A + Pst_3^A + \dots)^{1/A}$$

avec :

- Pst_n , flicker dû à la source n, qui peut être un autre four, un industriel ou le préexistant du réseau, la résultante de tous les autres utilisateurs du réseau.
- A, exposant dont la valeur de la probabilité choisie : A=1 pour $Pst_{50\%}$; A=2 pour $Pst_{75\%}$; A=3 pour $Pst_{90\%}$; A=4 pour $Pst_{99\%}$.

Certains fournisseurs d'électricité, notamment EDF, sont plus tolérants que la CEI. La norme européenne EN50160 préconise d'ailleurs en BT ou MT un niveau de compatibilité $PLT_{95\%} = 1$, ce qui correspond à $PST_{99\%} = 1.5$, au lieu de 1 pour la CEI. Pour mieux apprécier l'importance de cette différence, rappelons que la gêne effective varie comme le carré du Pst ! Ces limites de la CEI sont scientifiquement correctes mais pourraient être assouplies, de plus elles sont très coûteuses à satisfaire, d'autre part la gêne apportée par le flicker est subjective et non vitale. Ainsi un niveau de compatibilité de $PST_{99\%} = 1,2$ ou $PST_{95\%} = 1$ pourrait être recommandé, le fournisseur d'électricité restant libre de prescrire des niveaux d'émission inférieurs, par exemple $PST_{99\%} = 1$.

5.5. Evaluation du Pst dans le cas des fours à arc alternatifs

Le flicker d'un four AC peut être estimé au moyen de la formule suivante :

$$Pst_{99\%} = KST \cdot \frac{Scf}{Scc} \quad (5)$$

avec :

- Scf, puissance de court-circuit du four, vue au point de mesure HT.
- Scc, puissance de court-circuit du réseau amont, au point de mesure HT.
- KST, coefficient caractéristique du four, dépendant de nombreux paramètres : types de charge, points de fonctionnements, mécanique et régulation d'électrode, etc.... On a déterminé empiriquement $48 < KST < 85$, avec une valeur moyenne de 60. Des valeurs nettement plus faibles peuvent être obtenues en utilisant un chargement en continu des ferrailles, qui tombent dans le bain liquide.

Prenons comme exemple moyen un four de point nominal $S_f = 80$ MVA et $\cos\phi = 0.75$. On en déduit $Scf = S_f / \sin\phi = 120$ MVA. En supposant $KST = 60$ et une valeur autorisée de $Pst_{99\%} = 1$, on doit donc avoir $Scc = 7200$ MVA, ce qui est une valeur très élevée et rarement disponible, même en HT. D'où la nécessité de recourir à une compensation dynamique de la puissance réactive.

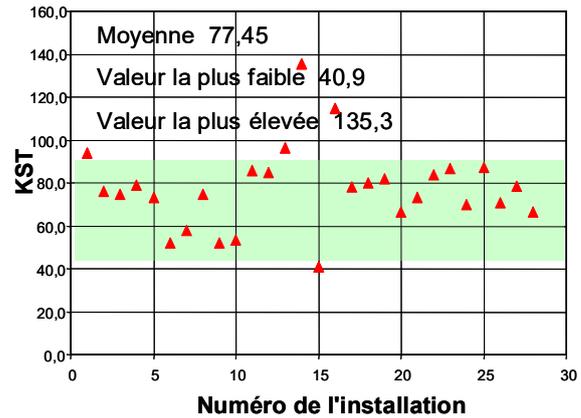


Figure 19 : Evaluation du KST sur des installations existantes

Les fluctuations d'un four AC sont totalement dissymétriques, une électrode pouvant même se trouver en court-circuit et une autre en rupture. Les optimisations successives conduisent depuis quelques années à rajouter systématiquement une inductance en MT (réduction de Scf , augmentation de la stabilité de l'arc), ce qui permet d'augmenter la puissance transmise et de diminuer le flicker, quitte à dégrader le $\cos\phi$. Typiquement, on a par exemple : en fusion 800V et $\cos\phi = 0.77$; et en affinage 700 ou 750V et $\cos\phi = 0.72$.

Pour tout type de perturbation, mais particulièrement pour le flicker, la mesure d'un niveau d'émission de la perturbation produite par un seul utilisateur, se heurte à deux problèmes très délicats :

- Le préexistant : la mesure prend forcément en compte la composition de la perturbation émise par l'utilisateur et de la perturbation préexistante, i.e. résultant de toutes les autres charges du réseau. Ce préexistant est parfois négligeable, mais il arrive souvent qu'il soit au contraire supérieur à l'émission. Il s'agit alors d'extraire ce préexistant de la mesure.
- La puissance de court-circuit : le niveau d'émission est imposé pour une puissance de court-circuit contractuelle, tandis que la puissance de court-circuit effective au moment de la mesure peut être différente et varier durant toute la durée de la mesure, en principe une semaine. On peut imaginer une correction à partir de la mesure de cette puissance, mais celle-ci s'avère très imprécise, d'autant plus qu'elle est plus grande, ce qui est le cas pour les fours à arc.

6. Filtrage.

6.1. Les harmoniques.

La compensation et l'élimination des composantes inverses conduisent à disposer sur le réseau de distribution MT des condensateurs dont l'évaluation a été faite. Il est bien difficile d'envisager des condensateurs sur un réseau sans créer des antirésonances avec les inductances du réseau (Scc). Ils

doivent donc être agencés en filtre, d'une part pour filtrer les harmoniques générés par les différentes charges et d'autre part maîtriser les résonances parallèles.

La définition, des harmoniques générés par un four à arc, n'est pas facile. Elle repose essentiellement sur l'observation d'un certain nombre d'installations, la figure 19 représente, en moyenne, les résultats de l'observation de plusieurs fours de fusion et de fours poche : ces derniers étant de puissances généralement plus faibles, ils fonctionnent essentiellement en affinage et sont moins perturbateurs des réseaux. Nous n'avons pas de données sur les interharmoniques, ils existent, mais leur valeur est notablement inférieure aux rangs réguliers évoqués.

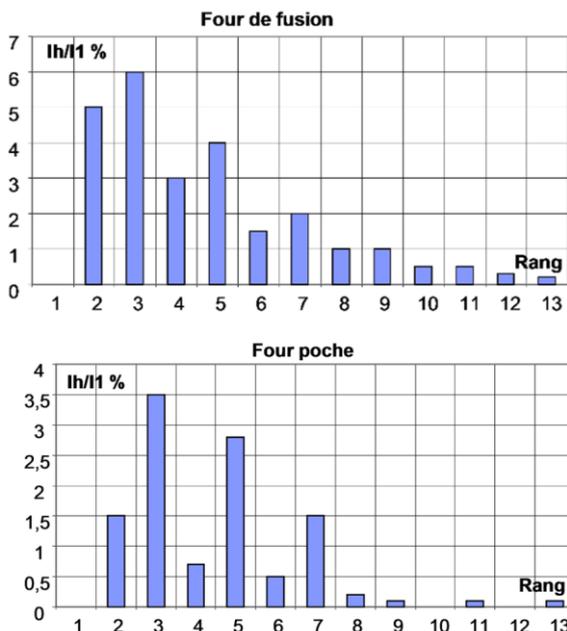


Figure 20 : Ordre de grandeurs des harmoniques des fours à arc

Les spectres sont riches, en particulier pour les basses fréquences, ce qui conduit à des filtres assez peu performants.

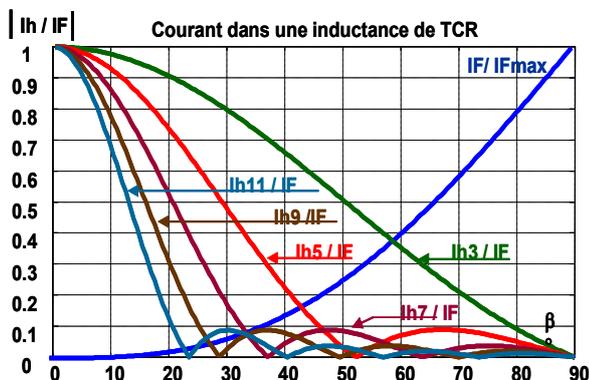


Figure 21 : Harmoniques dans un bras du TCR

Autre source d'harmoniques, le TCR lui-même. La forme des courants évoquée figure 11 contient des harmoniques de rang bas, 3 en particulier. Il est bien évident qu'en fonctionnement équilibré, les

harmoniques 3, 9 ... disparaissent dans les courants de ligne. Mais avec les charges déséquilibrées que sont les fours à arc, le fonctionnement équilibré est une exception. Il est donc nécessaire de prendre en compte, dans l'évaluation globale des harmoniques, le courant dans une inductance de l'absorbeur.

$$I_{hn} = \left(\frac{2 \cdot I_{F_{\max}}}{\pi} \right) \cdot \left\{ (-1)^{\frac{n-1}{2}} \cdot \frac{\sin(n-1) \cdot \beta}{n \cdot (n-1)} + (-1)^{\frac{n+1}{2}} \cdot \frac{\sin(n+1) \cdot \beta}{n \cdot (n+1)} \right\}$$

avec : $I_{F_{\max}} = \frac{U}{L \cdot \omega}$

6.2. Compensation - Filtrage

Prenons un cas concret, soit un four de 40 MW avec $\cos \varphi = 0,72$ soit $S_{ccf} = 80$ MVA. Le réseau qui alimente le transformateur de four est en 18 kV, en début de projet la puissance de court-circuit de réseau est de 1000 MVA.

Le formule expérimentale (5), basée sur l'expérience permet d'évaluer le Pst.

$Pst_{99} = 60 \times 80 / 1000 = 4,8$, cette valeur n'est bien entendu pas acceptable. Un statocompensateur s'impose. Mais même avec cet appareil, le résultat contractuel ne sera pas atteint. Un statocompensateur, dans les meilleures conditions ne permet qu'un gain de 2 voire exceptionnellement de 2,5 sur le Pst... La seule solution est donc une augmentation de la puissance de court-circuit du réseau (réduire S_{ccf} par adjonction d'inductances au primaire du transformateur, pourrait être une solution, mais le facteur de puissance du four étant faible, cela réduirait la puissance utile du four). Toujours par application de la formule (5) nous calculons la puissance de court-circuit minimale pour alimenter le four. Il s'agit de se fixer un Pst de 2 sachant que le statocompensateur permettra de le ramener dans les limites contractuelles.

Il faut donc rechercher, avec le distributeur, une solution d'alimentation avec :

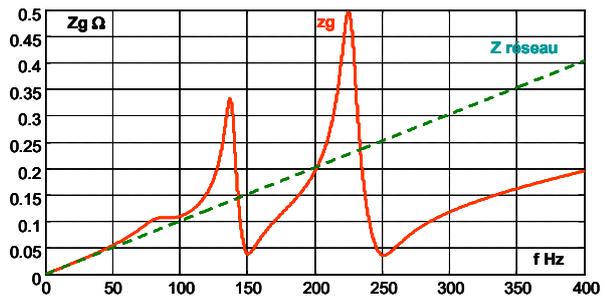
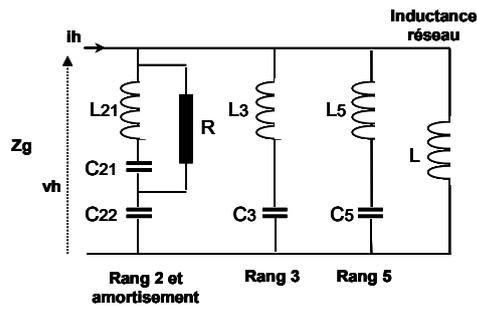
$$S_{ccr} = 60 \cdot 80 / 2 = 2400 \text{ MVA.}$$

La compensation à mettre en place est donnée par le tableau de la figure (10), $Q_{act} = \frac{3 \cdot S_{ccf}}{2}$, soit 120 MVAR.

Il est bien évident que cette compensation doit être agencée en filtre.

Les rangs 2, 3 et 5 sont pris en compte. On notera que le filtre sur le rang 2 est fortement amorti (filtre de « type C »), en fait le filtre de rang 2 est plus installé pour amortir les antirésonances des rangs 3 et 5 que pour filtrer...

Il faut noter que ce filtre C est particulièrement adapté à l'amortissement du fait de ses faibles pertes au fondamental : le circuit L21, C21 étant accordé sur la fréquence du réseau, les pertes dans R ne sont significatives pour les harmoniques. Mais, en conséquence le rang 2 sur lequel il est globalement accordé est faiblement filtré.



Réseau, $U_r = 18 \text{ kV}$, $S_{ccr} = 2400 \text{ MVAR}$, $f_r = 50 \text{ Hz}$, $L = 0,16 \text{ mH}$
 Four $P_f = 40 \text{ MW}$, $\cos \phi_f = 0,72$, $S_{ccf} = 80 \text{ MVA}$

$Q2 = 40 \text{ MVAR}$, $C22 = 1,1 \text{ mF}$, $C21 = 6,3 \text{ mF}$, $L2 = 1,6 \text{ mH}$, $R = 20 \Omega$
 $Q3 = 48 \text{ MVAR}$, $C3 = 1,3 \text{ mH}$, $I3 = 0,891 \text{ mH}$
 $Q5 = 32 \text{ MVAR}$, $C5 = 0,842 \text{ mH}$, $I5 = 0,481 \text{ mH}$

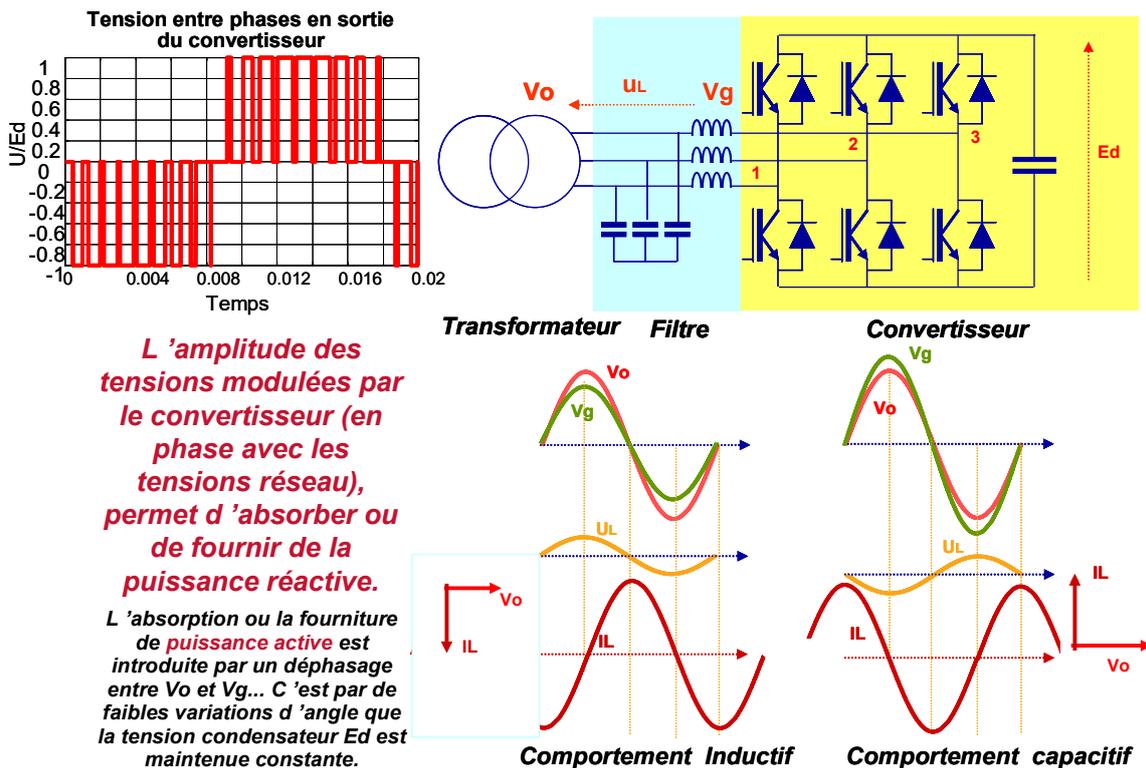
Figure 22 : Structure classique de filtrage

7. Le futur...

Réduire le Pst dans un rapport 2 c'est déjà beaucoup... Mais l'analyse de la mesure du Pst montre que des fréquences supérieures à 20 Hz sont pris en compte. Or il faut tenir compte du fait que la bande passante d'un statocompensateur est réduite. Pour

réduire de manière plus significative le Pst il est nécessaire d'avoir recours à un actionneur plus rapide, le STACOM (STATIC synchronous COMPensator). Avec ce type d'actionneur on peut espérer réduire un Pst dans un rapport 3 voire 4, pour autant que dimensionnement et contrôle soient satisfaisants.

Plusieurs schémas sont possibles



L'amplitude des tensions modulées par le convertisseur (en phase avec les tensions réseau), permet d'absorber ou de fournir de la puissance réactive.

L'absorption ou la fourniture de puissance active est introduite par un déphasage entre V_o et V_g ... C'est par de faibles variations d'angle que la tension condensateur E_d est maintenue constante.

Figure 23 : Principe du STATCOM – Absorber ou fournir de la puissance réactive

Bibliographie

- [X] Correction de la puissance réactive et des harmoniques – Jacques du PARC - Techniques de l'Ingénieur D 3215.
- [X] Réduction de la puissance réactive et des harmoniques - Jacques du PARC - Techniques de l'Ingénieur D 3210.
- [X] Fluctuations de tension et flicker – Parties (1) et (2) – Jacques COURAULT, Guillaume de PREVILLE, Jean-Louis SANHET – Techniques de l'Ingénieur D 4315.
- [X] Fours à arc – Maurice KRATZ - Techniques de l'Ingénieur D 5920.
- [X] Nouvelle alimentation pour les fours à arc alternatif – Thèse de Gianluca POSTIGLIONE – Institut National Polytechnique de Toulouse 2006.
- [X] Etude et maîtrise du flicker engendré par les fours à arc de sidérurgie – Bernard GOLLENTZ – Thèse Université de Franche-Comté.
- [X] Understanding facts – Narain G. HINGORANI, Laszlo GYUGYI – IEEE Press.
- [X] Thyristor-based facts controllers for electrical transmission systems – R. Mohan MATHUR, Rajiv VARMA – IEEE Press.

DETERMINATION DES MODES DE CONDUITE DES VEHICULES ELECTRIQUES DANS DES CONDITIONS REELLES PAR DES METHODES DE CLASSIFICATION.

SYMPOSIUM DE GENIE ELECTRIQUE (SGE 2018), 3-5 JUILLET 2018, NANCY

MOHAMED BEN-MARZOUK^{1,2,*}, GUY CLERC¹, SERGE PELISSIER², ALI SARI¹, PASCAL VENET¹

¹Univ Lyon, Université Claude Bernard Lyon 1, Ecole Centrale de Lyon, INSA Lyon, CNRS, Ampère, F-69622, Villeurbanne, France

²Université de Lyon, IFSTTAR, AME, LTE, 69500 Bron, France

*mohamed.ben-marzouk@univ-lyon1.fr

Résumé : Pour étudier le vieillissement des batteries des véhicules électriques (VE), il faut déterminer précisément leurs conditions d'utilisation. En effet, à cause des spécificités des VE, ces usages sont très différents de ceux rencontrés dans les voitures thermiques

Dans cet article, nous présentons comment à partir des données d'usages réels, nous déterminons les différents modes de roulage. Nous présentons les différentes techniques utilisées pour analyser et classifier les données et les différents modes d'usages obtenus.

Mots clés : Véhicule électrique ; usage réel ; modes de roulage ; modes d'usage ; classification ; batterie

1. Introduction

Grâce à la prise de conscience, de plus en plus importante chez les citoyens, sur les risques environnementaux et sur l'épuisement des ressources fossiles, et avec l'aide de la politique de plusieurs pays visant à baisser la pollution en ville, le véhicule électrique (VE) se trouve aujourd'hui en plein essor avec un nombre d'immatriculations qui ne cesse d'augmenter (hausse de 23% entre 2015 et 2016) [1]. Malgré cela, les VE restent néanmoins peu répandus principalement à cause des verrous technologiques liés aux batteries. En effet, celles-ci ont une autonomie faible, une durée de vie limitée et un prix actuellement élevé qui peut atteindre 40% de la valeur de la voiture.

Le problème de l'autonomie semble être en cours de résolution puisque les nouveaux modèles de VE affichent une autonomie plus importante que celle des modèles sortis il y a quelques années. De plus, le prix élevé des batteries peut être atténué par une production massive engendré par la démocratisation du VE. Cependant, le problème de la durée de vie reste toujours d'actualité. En effet, maîtriser la durée de vie des systèmes de stockage permet d'économiser sur le coût de remplacement en fin de vie et aussi sur le juste dimensionnement énergétique du système.

Il existe plusieurs travaux de recherche à travers le monde portant sur le vieillissement des batteries lithium-ion [2]–[4]. Cependant, les prédictions de durée de vie s'appuient souvent soit sur des modèles et des résultats issus d'essais de cyclage normalisés avec des profils de vieillissement accéléré constitués par des charges/décharges, partielles ou totales, à courants constants, soit sur des profils simplifiés inspirés d'usages réels mais qui sont composés d'impulsions

simples et ne représentent que partiellement la diversité des usages.

Pour étudier les problématiques liées à la durée de vie limitée des batteries en usage automobile, il est délicat de se fier aux simulations sur des cycles normalisés tels que le NEDC (New European Driving Cycle) ou le WLTC (Worldwide Harmonized Light Vehicles Test Cycles) car ils sont conçus pour les véhicules thermiques et donc leurs représentativités sont questionnables. Les VE et leurs fonctionnements, dépendent de nombreux facteurs et paramètres spécifiques, et pas seulement de la vitesse. Ils dépendent, en effet, du comportement de la batterie donc, entre autres, de la température et de son état de charge (SoC).

C'est pour cette raison que nous proposons de chercher, à partir des relevés réels des sollicitations des batteries et leurs conditions de fonctionnement, les différents modes d'usage des VE et leurs effets sur le vieillissement des batteries.

Dans cet article, nous présentons la méthodologie suivie pour chercher et identifier les différents modes d'usage des véhicules électriques. Tout d'abord, la base de données utilisée est présentée. Ensuite, les différentes étapes réalisées pour obtenir les différents modes d'usages sont détaillées.

2. Description des données

Cette étude se base sur des données réelles, extraites de l'usage d'une dizaine de VE et issues du projet CROME (CROss-border Mobility for Electric vehicles) [5]. Plusieurs partenaires français et allemands ont travaillé, dans le cadre de ce projet, pour concevoir, réaliser et analyser un système de mobilité électrique

entre la France et l'Allemagne. Ce projet a permis à l'IFSTTAR d'acquérir une très grande base de données relative à des VE en usage réel.

Ces VE, ayant la même architecture et appartenant à des volontaires particuliers et professionnels, ont été équipés avec des enregistreurs de données qui relèvent et transmettent, via une liaison GSM (Global System for Mobile communications), un grand nombre (quelques centaines) de variables liées au fonctionnement (vitesse, appuis frein, enfoncement pédale de l'accélération, etc.), des données liées aux batteries (courant, tension, température des cellules, etc.) et d'autres liées au moteur (couple, température moteur, etc.).

Pour chacun des véhicules, un suivi de près de 2 ans a permis de générer des milliers de fichiers. Chaque fichier représente un usage du VE en roulage ou en charge. Dans ces fichiers, nous trouvons un suivi de l'évolution de toutes les variables liées au VE au cours du temps avec une fréquence d'échantillonnage de 10 Hz.

Chaque VE possède un pack batterie de 16 kWh ayant une tension nominale continue de 325,6 V. Ces packs batterie sont constitués de 88 cellules en série de type LMO (lithium manganèse spinel). Ces cellules ont une capacité de 50A h et une tension nominale de 3,7 V.

Comme mentionné précédemment, nous avons des centaines de variables à étudier. Dans la détermination des différents modes d'usage, certaines variables ont plus d'importance que d'autres. C'est pour cette raison que nous avons procédé à la sélection de paramètres que nous allons décrire dans la partie suivante.

3. Sélection des variables significatives

Pour sélectionner les variables les plus significatives sans perdre d'information, les variables qui n'ont aucun lien avec les modes de fonctionnement des batteries ont été éliminées (comme la température de l'eau de refroidissement du moteur par exemple).

Ainsi, le nombre de variables à suivre a été réduit de plus de 500 à une centaine. Néanmoins, comme ce nombre de variables restait toujours important, nous avons utilisé les méthodes indiquées ci-dessous pour réduire leur nombre en limitant la perte d'informations.

3.1. Étude d'intercorrélation

L'objectif de cette manipulation est d'enlever les redondances et de garder qu'une seule variable sur un ensemble inter-corrélé. Nous calculons, dans cette partie, les coefficients de corrélation entre les variables.

Pour étudier les relations entre les variables, nous utilisons le coefficient de Pearson « r » (corrélation linéaire) et le coefficient de Spearman « ρ » (corrélation des rangs).

Selon S. Tufféry [6], même si les variables sont continues, « on a toujours intérêt à comparer les deux coefficients de Pearson et Spearman, le plus fiable étant le second », notamment pour détecter des liaisons non linéaires.

Dans les paragraphes suivants nous allons présenter ces deux coefficients de corrélations et les résultats obtenus.

3.1.1. Coefficient de corrélation linéaire "r" de Pearson

Ce coefficient permet d'étudier l'existence d'une relation linéaire entre deux variables X et Y . Il s'obtient en divisant la covariance entre X et Y (σ_{XY}) par le produit de leurs écart-type, respectivement σ_X et σ_Y .

$$r = \frac{\sigma_{XY}}{\sigma_X \sigma_Y} = \frac{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (X_i - \bar{X})(Y_i - \bar{Y})}{\sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (X_i - \bar{X})^2}{n}} \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (Y_i - \bar{Y})^2}{n}}} \quad (1)$$

Avec n le nombre d'observations, \bar{X} la moyenne de X et \bar{Y} la moyenne de Y .

3.1.2. Coefficient de corrélation de Spearman "ρ"

Nous avons aussi utilisé le coefficient de corrélation de Spearman, qui permet d'identifier une liaison monotone, linéaire ou non, entre les variables considérées. Cette technique étudie la relation entre les rangs de deux variables. Autrement dit nous n'utilisons pas les valeurs des observations dans les calculs mais leur rang. Si nous considérons une variable $X = (10, 13, 12, 22, 25, 8)$, X contient 6 observations, pour retrouver le vecteur rang_X , nous commençons par trier la variable X suivant un ordre croissant. Ensuite, nous remplaçons les valeurs que prend la variable X par leur numéro d'ordre. Ce qui donne $\text{rang}_X = (2, 4, 3, 5, 6, 1)$.

Pour calculer le coefficient de Spearman pour X et Y , nous pouvons utiliser l'équation (1) en remplaçant X par rang_X et Y par rang_Y . Ce coefficient peut aussi être donné par l'équation suivante.

$$\rho = 1 - \frac{6 \sum_{i=1}^n d_i^2}{n^3 - n} \quad (2)$$

Avec n le nombre d'observations et d_i la différence entre $\text{rang}_X i$ et $\text{rang}_Y i$

3.1.3. Condition de corrélation

Plusieurs variables sont fortement corrélées entre elles. Nous avons considéré dans la suite que deux variables X et Y sont fortement corrélées si elles suivent la condition suivante :

$$(\rho_{(X,Y)} > 0.75 \text{ ET } \rho_{(X,Y)} > 0.8) \quad (3)$$

Cette méthode permet d'avoir 18 groupes de variables inter-corrélées. Pour le reste de cette étude, nous choisissons une seule variable équivalente parmi un ensemble corrélé. Pour choisir correctement les variables à conserver, nous avons calculé et comparé les quantités d'informations contenues dans les variables en utilisant l'entropie de Shannon.

3.2. Sélection des variables

3.2.1. Entropie de Shannon

L'entropie de Shannon est une fonction mathématique qui peut mesurer la quantité d'information dans un signal. En effet, plus l'entropie d'un signal est grande, plus elle contient des informations non redondantes [7].

Considérons X un signal de m individus, contenant n symboles différents avec ($n < m$). Exemple : $X = (a ; b ; a ; c ; a ; b ; d)$, comme m est le nombre d'individus alors $m=7$ et dans le vecteur X il existe 4 symboles différents ("a", "b", "c" et "d") alors $n=4$. Pour mesurer la quantité d'information il faut tout d'abord calculer la probabilité d'apparence de chacun des symboles i avec ($i \in n$), nous l'appelons P_i . Pour notre exemple, $P = \left(\frac{3}{7}; \frac{2}{7}; \frac{1}{7}; \frac{1}{7}\right)$. Quant au calcul de l'entropie, nous appliquons l'équation (4). Pour notre exemple, nous obtenons $H(X)=1.8482$.

Avec P_i la probabilité d'apparence de chacun des symboles i avec ($i \in n$), l'entropie de chacune des variables est donnée par l'équation suivante :

$$H(X) = - \sum_{i=1}^n P_i \log_2(P_i) \quad (4)$$

Avant l'application de cette fonction, les données sont normalisées. Cette normalisation pour chacune des variables est calculée suivant l'équation (5). Nous appelons X_{norm} le vecteur normalisé de X . Pour chaque variable, la valeur maximale est égale à 1 et la valeur minimale 0. Nous ne conservons que 4 décimales pour X_{norm} .

$$X_{norm} = \frac{X - \min(X)}{\max(X) - \min(X)} \quad (5)$$

Lorsque nous avons un ensemble de variables corrélées, nous ne gardons que celui ayant l'entropie la plus élevée.

3.3. Résultats de l'étude de la corrélation

Cette méthodologie nous a permis de réduire le nombre de variables à étudier à 18 variables d'entrée non corrélées ou faiblement corrélées. La liste des variables sélectionnées et une brève description de chacune d'elles sont présentés dans le Tableau 1.

PKE et RPA sont des paramètres liés à l'éco-conduite qui sont liés à l'agressivité de la conduite [8], [9]

Toutes ces variables peuvent permettre de résumer comment et dans quelles conditions sont utilisées les batteries. Néanmoins, ce nombre de variables reste encore trop important pour réaliser une classification efficiente capable de déterminer les différents modes d'usage.

Tableau 1 : Liste des variables sélectionnées

Nom de la variable	Description	Unité
SoC initial	État de charge en début de roulage en %	
Courant charge maxi	Courant maximal de la batterie en phase de charge	A
Puissance charge moyenne	Puissance moyenne de la batterie en phase de charge	W
Décélération moyenne	Décélération moyenne du véhicule	m.s ⁻²
Q dech par km	Quantité de charge de la batterie dissipée par km	Ah/km
Q charge	Quantité de charge de la batterie récupérée	Ah
Distance	Distance du véhicule	km
Q decharge	Quantité de charge de la batterie dissipée	Ah
Vitesse moyenne	Vitesse moyenne du véhicule pendant le roulage	km/h
Vitesse maxi	Vitesse maximale du véhicule	km/h
courant de decharge maxi	Courant maximal de la batterie en phase de décharge	A
Courant efficace	Courant efficace de la batterie	A
Puissance de decharge moy	Puissance moyenne de la batterie en phase de décharge	W
RPA	Relative Positive Acceleration (RPA) du véhicule	m.s ⁻²
Accélération moyenne	Accélération moyenne du véhicule	m.s ⁻²
PKE	Positive acceleration Kinetic Energy (PKE) du véhicule	m.s ⁻²
Q auxiliaires	Quantité de charge de la batterie consommée par les auxiliaires	Ah
Température ambiante	Température ambiante	°C

4. Réduction des dimensions

Le nombre de variables étant toujours élevé, nous avons appliqué la méthode de l'Analyse en Composantes Principales (ACP) afin de le réduire en projetant les variables sur les axes de l'ACP tout en déformant le moins possible la réalité [10].

4.1. Définitions

L'ACP est une méthode fondamentale dans les statistiques descriptives multidimensionnelles. Elle permet le traitement simultané de n'importe quel nombre de variables.

L'ACP projette des données sur des axes orthogonaux, ce qui signifie qu'il s'agit d'une transformation de variables pouvant être corrélées, à de nouvelles variables non corrélées. Ce processus réduit non seulement le nombre de variables mais rend également l'information moins redondante.

Le choix de dimension, autrement dit le nombre de composantes à considérer est une étape très importante. Elle dépend principalement de la qualité de la projection des observations et des variables sur les axes de l'ACP.

4.2. Définitions

Pour bien choisir le nombre de composantes à retenir, il y a plusieurs pratiques adaptées. Nous citons ici le critère de coude (rupture de pente) et la loi de Kaiser [11] qui propose de ne retenir que les axes qui ont une inertie supérieure ou égale à l'inertie moyenne [12]. L'inertie totale d'un nuage de points est la somme des carrés des distances des points par rapport au centre de gravité. L'inertie moyenne est l'inertie totale divisée par le nombre de variables. Lorsque nous projetons les données sur les axes de l'ACP, nous pouvons calculer l'inertie expliquée par chacune des composantes principales. Ce calcul va nous permettre d'appliquer ces deux critères pour le choix du nombre de composantes principales.

Le graphe suivant (Fig. 1) montre l'inertie expliquée par chaque axe de l'ACP par rapport à l'inertie totale.

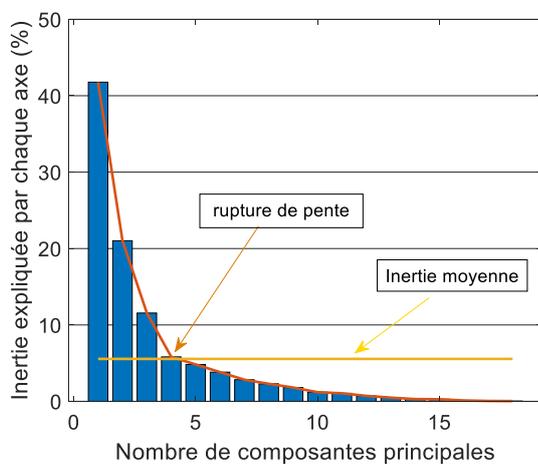


Fig. 1 : Inertie pour chaque composante principale

Dans notre cas, en suivant les 2 critères cités précédemment, nous pouvons nous arrêter à 4 axes et considérer 80% de l'inertie totale. Il faut tout de même vérifier si avec seulement 4 axes la qualité de la projection des variables est acceptable. La qualité de la projection des variables est calculée de la façon suivante [6], [13] :

$$QV_n = \sum_{i=1}^n \text{corr}^2(V, Ax_i) \quad (6)$$

avec QV_n la qualité de projection de la variable "V" sur "n" axes d'ACP. corr^2 est le carré de la corrélation de Pearson. V représente le vecteur des données de la variable "V". Ax_i est le vecteur des données du $i^{\text{ème}}$ axe de l'ACP.

Le tableau suivant illustre la qualité de la projection des variables par rapport au nombre de composantes principales. La couleur rouge signifie une mauvaise qualité de projection et la couleur verte une bonne qualité de projection.

Tableau 2. Qualité de projection des variables en fonction du nombre de composantes principales

	Nombre d'axes (composantes principales)						
	1	2	3	4	5	6	7
SoC initial	1%	1%	1%	95%	95%	99%	99%
Courant charge maxi	43%	51%	53%	53%	68%	75%	77%
Puissance charge moy.	47%	66%	69%	70%	70%	75%	75%
Deceleration moy.	0%	84%	84%	84%	87%	94%	94%
Q dech par km	1%	3%	74%	74%	78%	80%	89%
Q charge	52%	52%	60%	60%	76%	84%	90%
Distance	61%	86%	86%	88%	88%	94%	94%
Q decharge	68%	87%	88%	90%	91%	97%	97%
Vitesse moy.	74%	79%	81%	81%	96%	96%	97%
Vitesse maxi	85%	86%	87%	88%	88%	89%	89%
courant de dech maxi	66%	68%	73%	75%	81%	83%	83%
Courant efficace	81%	92%	94%	94%	95%	96%	97%
Puis. dech moy	80%	83%	85%	85%	94%	94%	97%
RPA	41%	91%	92%	92%	96%	96%	96%
Acc. moy.	0%	88%	88%	89%	89%	94%	94%
PKE	9%	79%	82%	83%	92%	92%	92%
Q auxiliaires	17%	25%	75%	76%	77%	81%	83%
Temp. ambiante	1%	1%	57%	59%	67%	67%	99%

Les deux critères cités précédemment recommandent un choix de 4 axes d'ACP. Mais selon le Tableau 2, il est plus judicieux de choisir 7 composantes principales parmi 18 (nombre de variables) pour garantir une qualité de projection supérieure à 75% pour chacune des variables.

Cette étape nous a donc permis de réduire la dimension et d'éliminer les redondances ce qui permet de réaliser une meilleure identification des modes de fonctionnement.

5. Identification des modes de cycles de conduite

Une fois le nombre de variables réduit au maximum, nous pouvons étudier les cycles de conduite (roulages) définis entre 2 arrêts « moteur » du VE. Comme nous avons plusieurs milliers de roulages enregistrés, nous sommes intéressés à identifier les similitudes et les non-similitudes entre ces roulages. Nous cherchons ainsi à obtenir plusieurs classes de cycles de conduite en faisant appel aux techniques de classification.

5.1. Méthodes de classification

Les méthodes de classification peuvent être divisées en deux familles principales :

- la classification supervisée où des éléments sont déjà classés et où l'ajout de nouveaux éléments est à effectuer,
- la classification non supervisée lorsque nous n'avons pas de connaissance préalable des classes.

Dans cette étude, puisque nous ne disposons pas de connaissances préalables sur les classes, nous utilisons une méthode de classification non supervisée pour identifier les modes d'usage des VE. La classification non supervisée est une technique de traitement des données qui vise à classer un ensemble de données en minimisant la distance intra-classe et en maximisant autant que possible la distance entre les classes. Il existe de nombreuses techniques de mesure de distance [14] comme la distance de Manhattan et la distance

euclidienne. Dans cette partie, nous utilisons le carré de la distance euclidienne.

Il existe plusieurs méthodes de classification non supervisée, les plus connues étant la Classification Ascendante Hiérarchique (CAH) et les « k-means » [6].

5.1.1. Classification Ascendante Hiérarchique (CAH)

La CAH regroupe itérativement les individus en agrégeant 2 par 2, les éléments les plus proches qui permettent de construire progressivement un dendrogramme (diagramme en arbre) qui regroupe à la fin tous les individus d'une même classe. Sur la Fig. 2, nous présentons un exemple qui illustre l'algorithme du CAH. L'algorithme commence par regrouper les observations Ob1 et Ob2 car ce sont les éléments les plus proches. Ensuite, Ob3 et Ob4 sont regroupés. La fin du calcul est atteinte lorsque toutes les observations sont réunies dans un même groupe.

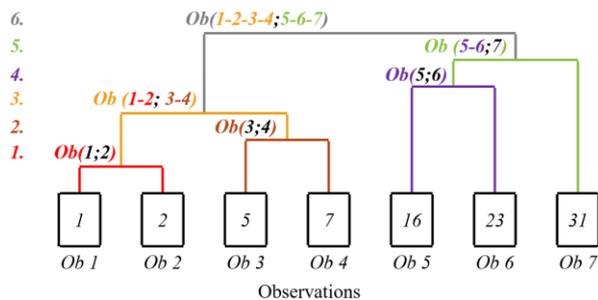


Fig. 2 : Illustration de l'algorithme de CAH

5.1.2. K-means

La méthode des « k-means » consiste à regrouper les observations en k groupes de sorte que les distances intra-classes soient minimales et les distances entre classes maximales. L'algorithme « k-means » fonctionne comme suit :

Après avoir initialisé k points (aléatoirement ou non) et en considérant leurs centroïdes (centres de gravité), l'algorithme répartit les points (observations) dans les k classes ainsi formées en fonction de leur proximité avec le centroïde. Ensuite, l'algorithme recalcule les centres de gravité des classes et les considère comme de nouveaux centroïdes. L'algorithme répète ces 2 étapes jusqu'à ce qu'il n'y ait plus de changement. La figure 4 illustre le fonctionnement de l'algorithme « k-means »

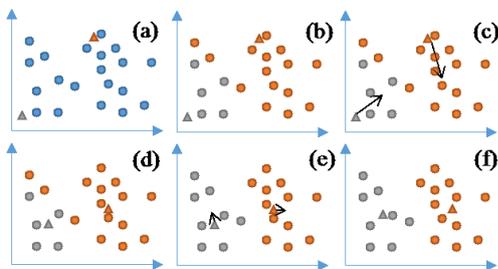


Fig. 3 : Illustration de l'algorithme des « k-means »

La figure 4 (a) montre l'initialisation des centroïdes (marqueurs triangulaires), les points sont en bleu pour indiquer qu'ils n'appartiennent encore à aucune classe.

La figure 4 (b) montre comment les points sont classés parmi 2 classes (grise et orange). Les figures 4 (c) et (d) présentent l'étape du calcul des nouveaux centroïdes. La figure 4 (e) représente une autre itération des étapes précédentes. Enfin, la figure 4 (f) montre le résultat final de cette classification.

5.2. Classification des roulages

Pour classer ces roulages, nous avons choisi la méthode des « k-means » car elle est plus rapide. A l'opposé de la CAH, elle effectue une mise à jour des centres des classes après chaque nouvelle affectation pour suivre l'évolution de son contenu. Dans la CAH, si deux individus sont placés dans des classes différentes, ils ne sont jamais comparés à nouveau.

Les résultats obtenus ont révélé que pour classer correctement les roulages avec un minimum de classes, nous devons en garder 5. Ainsi avec 5 classes seulement nous pouvons expliquer près de 60% de la variance (pour expliquer 100% de la variance il faudrait que le nombre de classes soit égal au nombre de roulages sachant que notre base de données comporte près de 8000 roulages).

La proportion de la variance expliquée R^2 est un indicateur de la qualité de la classification. Elle peut s'exprimer grâce à l'équation suivante :

$$R^2 = \frac{I_B}{I} = \frac{I_B}{I_B + I_W} \quad (7)$$

avec I l'inertie totale, I_B l'inertie interclasses et I_W l'inertie intra classes. Ces deux inerties peuvent s'exprimer par :

$$I_B = \sum_i^k distance(C_i, C) \quad (8)$$

$$I_W = \frac{1}{n} \sum_i^k \sum_{l_{ji}}^{m_i} distance(l_{ji}, C_i) \quad (9)$$

k est le nombre de classes, C_i est le centre de la classe i, C représente le centre de gravité de tous les roulages, n est le nombre de roulages, m_i est le nombre de roulages appartenant à la classe i et l_{ji} est le roulage numéro j appartenant à la classe i.

5.3. Résultats obtenus

Après le classement des cycles de conduite en 5 catégories, nous avons considéré qu'un mode de fonctionnement est la moyenne des roulages appartenant à la même classe.

La Fig.4 montre la différence entre les modes de fonctionnement selon les 18 variables choisies précédemment.

Selon les variables « distance », « vitesse moyenne » et « vitesse maximale », nous pouvons constater que les modes 1 et 2 représentent les cycles de conduite urbains et les modes 4 et 5 les cycles de conduite qui incluent des parties d'autoroute. De plus, selon les variables « Accélération moyenne », « décélération moyenne », «

RPA » (Relative Positive Acceleration - indicateur fondé sur l'accélération et la vitesse) et « PKE » (Positive Kinetic Energy – indicateur de variation de l'énergie cinétique), nous pouvons remarquer que le mode 4 décrit un comportement plus agressif comparé au mode 5. Il en est de même pour le mode 2 par rapport au mode 1.

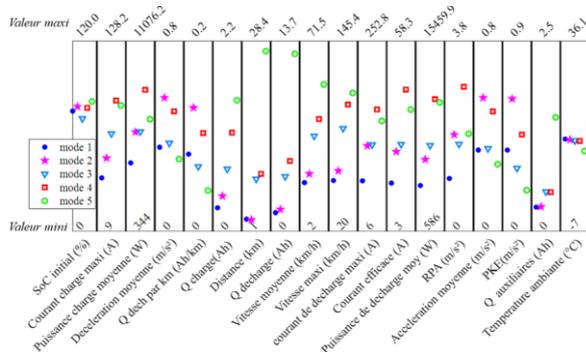


Fig. 4 : Caractéristique de chaque mode d'usage

Cette méthodologie permet d'obtenir plusieurs classes de cycles de conduite qui dépendent de différentes variables. Nous allons par la suite étudier l'influence de ces différents modes de roulage sur le vieillissement des batteries.

6. Conclusion

Le présent travail montre comment à partir d'enregistrements réels sur des véhicules électriques et de sollicitations des batteries, nous déterminons différents modes de fonctionnement des batteries. En utilisant plusieurs outils de sélection basés sur les coefficients de corrélation de Pearson et de Spearman, sur l'entropie de Shannon, nous avons réduit le nombre de paramètres à 18. Pour une meilleure qualité de classification, nous avons utilisé la technique ACP qui a permis de réduire la dimension et d'éliminer les redondances. Une analyse de type « k-means » nous a permis de trouver 5 modes d'usages différents. Chaque mode est défini par les valeurs des 18 paramètres précédemment identifiés. Les outils développés dans ce travail permettront d'étudier les liens potentiels entre le taux de vieillissement des batteries et les modes d'utilisation identifiés.

Remerciements

Nous remercions la région Auvergne-Rhône-Alpes pour son soutien financier pour ce travail.

References

- [1] Avere-France, « véhicules électriques immatriculés en 2016 », Avere-France. [En ligne]. Disponible sur: http://www.ave-re-france.org/Site/Article/?article_id=6826.
- [2] S. B. Peterson, J. Apt, et J. F. Whitacre, « Lithium-ion battery cell degradation resulting from realistic vehicle and vehicle-to-grid utilization », J. Power Sources, vol. 195, no 8, p. 2385-2392, avr. 2010.
- [3] E. Wood, M. Alexander, et T. H. Bradley, « Investigation of battery end-of-life conditions for plug-in hybrid electric vehicles », J. Power Sources, vol. 196, no 11, p. 5147-5154, 2011.
- [4] E. Redondo-Iglesias, P. Venet, et S. Pelissier, « Eyring acceleration model for predicting calendar ageing of lithium-ion batteries », J. Energy Storage, vol. 13, p. 176-183, oct. 2017.
- [5] P. Kreczanik, B. Jeanneret, et S. Pelissier, « Construction of Database on Real World Uses of Electric Vehicles-A French Case », in Vehicle Power and Propulsion Conference (VPPC), 2014 IEEE, 2014, p. 1-5.
- [6] S. Tufféry, Data mining et statistique décisionnelle - 4ème édition, 4e édition. Paris : Editions technip, 2012.
- [7] R. M. Gray, Entropy and information theory, 2nd ed. New York : Springer, 2011.
- [8] K. S. Nesamani et K. P. Subramanian, « Development of a driving cycle for intra-city buses in Chennai, India », Atmos. Environ., vol. 45, no 31, p. 5469-5476, oct. 2011.
- [9] G. Castignani, T. Derrmann, R. Frank, et T. Engel, « Validation study of risky event classification using driving pattern factors », in 2015 IEEE Symposium on Communications and Vehicular Technology in the Benelux (SCVT), 2015, p. 1-6.
- [10] G. Saporta, Probabilités, analyse des données et statistique. Paris : Technip, 2011.
- [11] D. D. Suhr, « Principal component analysis vs. exploratory factor analysis », SUGI 30 Proc., vol. 203, p. 230, 2005.
- [12] A. S. Beavers, J. W. Lounsbury, J. K. Richards, S. W. Huck, G. J. Skolits, et S. L. Esquivel, « Practical considerations for using exploratory factor analysis in educational research. », Pract. Assess. Res. Eval., vol. 18, 2013.
- [13] R. R. Herrera et D. S.-L. Gac, Initiation à l'analyse factorielle des données : Fondements des mathématiques et interprétations, cours et exercices. Paris : Ellipses Marketing, 2002.
- [14] M. Bora, D. Jyoti, D. Gupta, et A. Kumar, « Effect of different distance measures on the performance of K-means algorithm: an experimental study in Matlab », ArXiv Prepr. ArXiv14057471, 2014.

Enjeu du Bio-Encrassement des Systèmes de Récupération des Energies Marines Renouvelables : Etat de l'Art sur les Impacts et sur la Prévention

HOSNA TITAH-BENBOUZID, MOHAMED BENBOUZID

Université de Bretagne Occidentale, UMR CNRS 6027 IRDL, 29238 Brest Cedex 03
 hosna.titahbenbouzid@gmail.com, Mohamed.Benbouzid@univ-brest.fr

Résumé: Plusieurs études ont été menées, ces dernières années, dans le but d'évaluer les dommages causés par l'encrassement biologique (bio-encrassement ou biofouling), qui est défini comme étant la fixation d'organismes sur une surface en contact avec l'eau pendant une période donnée. Tel qu'il est présenté, le problème bio-encrassement semble assez simple. Malheureusement, il existe une multitude d'organismes marins ainsi que plusieurs types de surfaces affectées ; ce qui, par conséquent, conduit à différentes solutions pour résoudre le problème bio-encrassement. Dans le contexte des énergies marines renouvelables, les systèmes de récupération d'énergie sont soumis aux mêmes processus de contamination liés au bio-encrassement. Dans ce contexte, cet article propose un état de l'art complet sur la problématique du bio-encrassement des systèmes de récupération des énergies marines renouvelables. L'analyse proposée mettra particulièrement en évidence les impacts du milieu marin et les solutions pour prévenir le bio-encrassement. Les défis rencontrés par le marché des énergies marines renouvelables sont également abordés.

1. Introduction

La corrosion et l'encrassement biologique ont été une inspiration pour l'étude des interactions entre les microorganismes et les surfaces solides. Ce phénomène est essentiel dans un environnement marin, où le zooplancton est relativement diversifié et abondant, mais il se retrouve à des proportions moindres, dans des environnements d'eau douce. Le bio-encrassement marin peut affecter les coques de bateau, les constructions portuaires et les quais, ainsi que les installations d'ingénierie sous-marines [1-2]. La pêche et la pisciculture sont également touchées dans les cages et les chalutiers contenant des organismes contaminants, par exemple. En Australie, le bio-encrassement représente environ 80% des prix de l'industrie de la perle [3]. Les composants en or et en silicium des dispositifs micro-électrochimiques utilisés dans l'exploitation de médicaments sont sensibles au bio-encrassement, tout comme les machines des industries du papier, de la pâte à papier et de l'instrumentation [4]. Des études sont en cours sur les revêtements peu adhésifs qui sont utilisés comme revêtements antisalissure sur les équipements marins. Il a été constaté que le dépôt d'organismes sur la coque d'un navire pouvait considérablement augmenter la résistance à la traînée et, par conséquent, la consommation de carburant. Il serait souhaitable de disposer d'un revêtement non toxique et mécaniquement stable pour empêcher l'adhésion des agents d'encrassement [5]. Les groupes d'organismes qui contribuent à l'encrassement marin comprennent: les algues, les bivalves, les crustacés et les balanes. Le biofouling marin peut être divisé en deux groupes d'organismes : 1) organismes du microfouling et 2) organismes du macrofouling (Fig. 1).

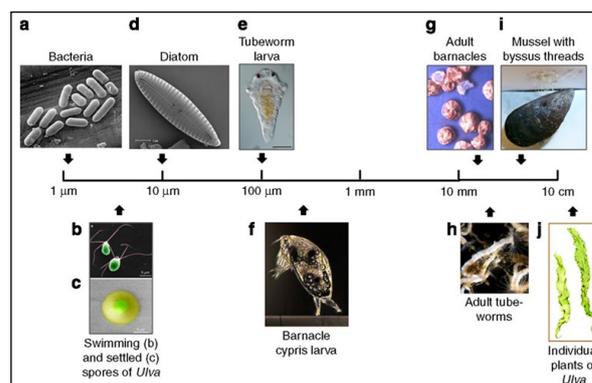


Figure 1 : Organismes du microfouling et du macrofouling [6].

1.1. Organismes du microfouling

Le processus de bio-encrassement n'est pas aussi simple qu'il y paraît car l'agencement des organismes ne colle pas sur le substrat en tant que ventouse. En effet, ce processus composite commence souvent par la production d'un biofilm. C'est un film constitué de bactéries, telles que des thiobacilles ou d'autres micro-organismes, qui se développent dans des conditions favorables sur un matériau [7]. Tout substrat placé dans l'eau de mer sera rapidement colonisé par ces organismes, qui sont principalement de nature bactérienne et microbienne. Ils constituent un revêtement collant communément appelé biofilm, qui s'accumule suffisamment en épaisseur pour masquer les surfaces marines, ce qui augmente les difficultés d'exploitations sous-marines. Ils représentent une nuisance considérable et constituent également une source de nourriture et une interface pratique à laquelle peuvent adhérer des organismes plus gros, les macrofouling.

1.2. Organismes du macrofouling

La progression d'un biofilm peut augmenter jusqu'à un stade où il alimente un support pour la croissance des algues, des nacrés et d'autres organismes [8]. Les macrofouling apportent des complications supplémentaires et encore plus alarmantes pour les conducteurs sous-marins. Ce groupe comprend de nombreux animaux et plantes qui peuvent être classifiés en individus ou en grandes colonies, tels que des balanes, des moules, des polychètes et diverses espèces de bryozoaires et d'hydroïdes: des particules d'encrassement abrasif en suspension vont croître [9]. Lorsque la croissance de ce bio-encrassement est en contact avec les systèmes de récupération d'énergies marines, les systèmes houlomoteurs seront davantage affectés que les systèmes hydroliens. Ces derniers, en particulier les moyeux de rotor (pièces à faible vitesse), seront contaminés même à 5 m de profondeur [10]. Dans ce contexte particulier, cet article vise à fournir une analyse complète de l'état de l'art permettant d'évaluer les problèmes du bio-encrassement des systèmes hydroliens et houlomoteurs. L'examen proposé mettra particulièrement en évidence le phénomène de bio-encrassement, sa compréhension et les solutions préventives.

2. Modes de développement du bio-encrassement

Le processus complexe de colonisation est défini comme l'adhésion et la croissance d'organismes vivants sur des surfaces artificielles immergées. En milieu marin, tout système de récupérations des énergies marines renouvelables pourrait être colonisé par des organismes tels que des bactéries, des diatomées, des protozoaires, des algues et des invertébrés [11-12]. La figure 2 résume les quatre séquences d'un processus d'installation typique de bio-encrassement: conditionnement biochimique, colonisation bactérienne, installation d'espèces unicellulaires et installations d'espèces multicellulaires [13]. Au début, après contact avec l'eau, le conditionnement biochimique est décrit comme étant l'adsorption de composés chimiques dissous (principalement des macromolécules) sur n'importe quelle surface. Ce moment d'*immersion* peut être l'extrusion d'un brin d'herbe marine de sa gaine, l'apparition d'une nouvelle coquille de crustacé après la mue, l'émergence d'une nouvelle surface rocheuse après la rupture ou l'immersion expérimentale d'une lame de verre, etc.

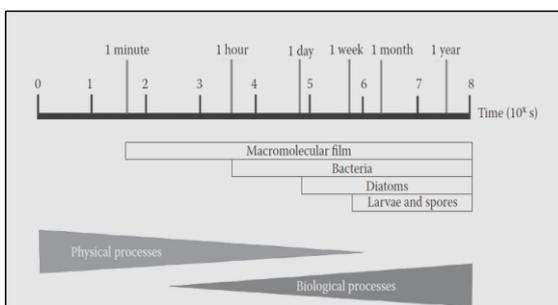


Figure 2 : Schéma d'une séquence de colonisation menant à la création d'une communauté de biofouling [11].

Le regroupement des molécules organiques aux interfaces (solide/liquide, liquide/gaz) est purement physique et spontané [14]. La colonisation bactérienne de la zone comprend une phase d'approche réversible (adsorption) et une phase de fixation irréversible (adhésion). Lors de la première étape de la séquence de colonisation (conditionnement biochimique), l'adsorption bactérienne est principalement régie par des forces physiques: mouvement brownien, interaction électrostatique, gravité, forces de Vander-Waal [15-18]. Lorsque le film macromoléculaire adsorbé qui est constitué de deux cellules bactériennes de surface, est principalement chargé négativement [19-21], les forces de répulsion et d'attraction électriques opposées tendent à immobiliser la cellule à une distance de 15 à 20 nm [22]. La production de fibrilles de polysaccharide (principalement du glucose et du fructose) évolue et constitue une barrière électrostatique. L'établissement de liaisons covalentes entre le glycocalyx bactérien et le film macromoléculaire empêche la phase d'adsorption de fondre en une phase d'adhésion. Des mécanismes similaires ont été décrits pour les levures [23], les algues unicellulaires [24], les spores [22] et les larves de polychètes (Fig. 3) [25]. La colonisation par l'étape eucaryote unicellulaire inclut l'arrivée de levures, protozoaires et diatomées, avec une dominance quantitative claire de ce dernier [26-28]. Les diatomées benthiques se fixent par la sécrétion de mucus [29-30] et recouvrent de manière dense les zones de large substrat et contribuent de manière significative à l'évolution chimique / biologique du substrat. Par la suite, les colonisateurs protozoaires se nourrissent de micro-organismes (bactéries, levures, diatomées et autres protozoaires) [31].

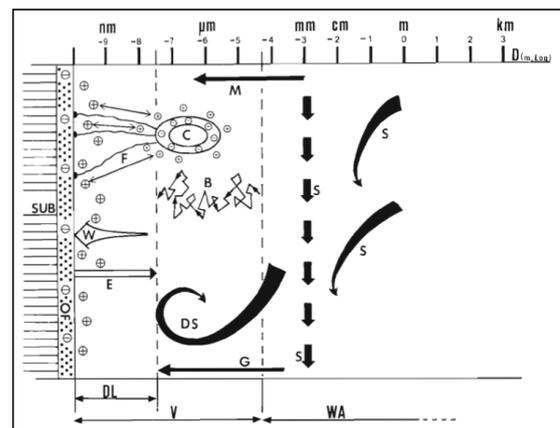


Figure 3 : Forces dominantes en fonction de la distance de couche macromoléculaire précédemment adsorbée. Adsorption bactérienne [13].

Une à plusieurs semaines après l'immersion, le substrat présente une colonie microbiotique hautement différenciée et structurée en 3D. Plusieurs jours ou semaines après le conditionnement biochimique, la dernière et la plus longue phase d'eucaryotes multicellulaires commence par la colonisation de larves de méroplancton et de spores d'algues. Cela empiète sur l'incorporation et l'évolution continue de la communauté micro épibiotique (communauté de micro-organismes vivant à la surface d'un substrat sans dépendre de ce dernier) [13]. Après ces 4 étapes successives, la contamination de la communauté évolue continuellement à travers d'autres mécanismes [32-33].

En résumé, la plupart des mécanismes peuvent être - et sont souvent - combinés pour former une adaptation anti-encrassement multifactorielle, qui couvre efficacement la gamme des colons potentiels (Fig. 3).

3. Altération des performances des systèmes de récupération des énergies marines renouvelables

La plupart des constructions artificielles, déployées dans un environnement marin, sont des matériaux non naturels. Ces matériaux, tels que le bois traité, le caoutchouc, le béton, le métal, le plastique rigide, le verre ou la fibre de verre, sont malheureusement affectés par la prolifération du bio-encrassement, qui constitue un développement inopportun sur les matériaux ; bien que dans certains récifs, le développement du bio-encrassement est recherché pour la faune et la flore marines.

Dans le domaine des énergies marines renouvelables, il a été clairement mis en évidence une liaison entre le volume structurel, la complexité des récifs artificiels et l'augmentation de l'abondance des espèces [34-35]. Le bio-encrassement des structures artificielles, telles que les systèmes de récupération des énergies marines renouvelables, entraînera donc des coûts supplémentaires importants par l'altération des performances ou de la durée de vie des équipements [36]. En effet, l'obstruction de ces systèmes est l'une des principales conséquences du bio-encrassement entraînant une augmentation de la masse et de la traînée, ce qui a donc un impact négatif sur l'efficacité du système (Fig. 4) [37]. En général et en termes de structures offshores, le bio-encrassement est un problème majeur, car il augmente les coefficients de traînée et d'inertie, ainsi que le poids structurel [38-40].

Les assemblages épibiotiques peuvent affecter les bouées houlomotrices et donc devenir un fardeau technique. La dynamique des bouées et leur capacité à extraire l'énergie d'une vague dépendent de leur taille et de leur forme, de la masse des pièces en mouvement et du PTO (Power Take-Off) [41]. Dans les cas les plus extrêmes de bio-encrassement, la masse supplémentaire entraîne la submersion de la bouée [42]. L'impact sur sa position basse peut réduire l'efficacité de récupération d'énergie même si le dispositif ne coule pas car le bio-encrassement modifiera la masse de la bouée et l'eau environnante [43].

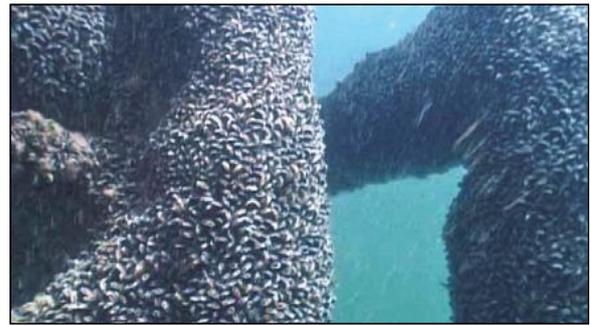


Figure 4 : Colonisation par les moules sur les structures de protection du parc éolien offshore Horn Rev au Danemark.

De plus, cela entraînera une augmentation des turbulences autour de la bouée, élevant ainsi la dissipation d'énergie due aux pertes visqueuses induites par la grande rugosité de la surface de la bouée [44]. Il est donc important d'étudier l'impact du bio-encrassement sur l'absorption d'énergie par le système houlomoteur (bouée). Idéalement, les bouées houlomotrices devraient être conçues de manière à ce que le bio-encrassement ait un impact négligeable sur les performances [36]. Il peut gravement affecter la flottabilité et la dynamique d'une bouée, ainsi que le système d'ancrage. Il y a aussi le poids supplémentaire dans les eaux tempérées, principalement causé par les moules, par exemple les moules bleues (*Bivalvia*) et les balanes (*Cirripedia*), dont les densités peuvent être supérieures à 10 kg/m^2 (Fig. 5), alors que les algues vont affecter la dynamique de la bouée et non pas son poids [45-47].

La rugosité des pales de turbine due aux impacts, à la cavitation ou à la décharge de particules et au bio-encrassement constituent deux problèmes de performances potentiels pour les hydroliennes [48-49]. Dans ce cas, un grand besoin de stabilité est clairement nécessaire à cause des problèmes d'accès à la maintenance qui deviennent difficiles en environnement sous-marin. Peu d'études ont été consacrées aux effets de rugosité ou de bio-encrassement sur les hydroliennes. Dans [50], les effets potentiels des balanes ont été étudiés.



Figure 5. Bouée directionnelle fortement encrassée [46].

Les coefficients de portance et de traînée d'un profil aérodynamique recouvert de balanes modélisés avec des distributions de différentes tailles et de densités ont été déterminés à l'aide d'une soufflerie. Le rapport de la portance par rapport à la traînée diminue à la fois avec l'augmentation de la taille de la balane et de la densité de distribution. Il a été conclu que la présence des balanes aurait un effet néfaste sur l'efficacité des turbines. En effet, le bio-encrassement réduit l'efficacité des pales de turbine et par conséquent, la production globale d'énergie. Dans [51], les auteurs étudient, à l'aide de modèles numériques, les effets de rugosité sur les pales ou l'effet potentiel du bio-encrassement. On y conclue que la présence de rugosité ou de bio-encrassement augmenterait le coefficient de traînée jusqu'à 50% [52]. La rugosité de surface pourrait modifier l'angle de décrochage. Cela a été démontré expérimentalement pour des sections de turbines d'éoliennes plus épaisses [53-54]. En terme d'encrassement des pales, il a été constaté une diminution significative de la puissance des TSR (Tip Speed Ratio) élevés. Il est donc important de prendre en considération la maintenance des turbines en fonction de facteurs tels que les zones d'exploitation et la température de l'eau [55], ainsi que les zones sensibles à surveiller (endommagées par le bio-encrassement) [56].

Dans le domaine des énergies renouvelables, il convient de souligner que la maintenance et la survivabilité des systèmes constituent un facteur économique majeur [57]. Il s'agit d'un problème particulièrement critique dans le contexte des énergies marines renouvelables [58].

4. Prévention du bio-encrassement

Les effets secondaires du bio-encrassement sur les systèmes de récupération des énergies marines renouvelables sont typiques et se résument dans ce qui suit : Une élévation du coefficient de frottement, due à la rugosité générée, entraînant une augmentation de poids qui entraîne à son tour une réduction de la vitesse et une perte de maniabilité. L'application de mesures correctives entraînera malheureusement une augmentation de la consommation du système de récupération. Au cours du processus bio-encrassement, des déchets toxiques sont également générés [59-60] ; la détérioration du revêtement favorise la corrosion, la décoloration et l'altération de la conductivité électrique [61]. L'introduction de nouvelles espèces (non présentes naturellement - espèces invasives ou non indigènes) est également observée [62-63].

Depuis l'antiquité et jusqu'au début de l'ère des grandes découvertes marines, les grands navires ont été gravement endommagés par l'espèce *Lepadomorpha* et d'autres organismes marins. Les Phéniciens, les Egyptiens et les Romains utilisèrent plusieurs techniques pour les combattre : le doublage de la coque par une seconde coque en bois, cuivre ou plomb [64]. Outre les goudrons, les premières recettes connues de peintures protectrices et biocides ont été inventées par les

chantiers navals de l'ancienne marine. A l'origine, ce sont les peintures à base de chaux qui ont été utilisées [65]. A l'époque de Christophe Colomb, des revêtements cireux étaient utilisés (mélange de poix, de suif ou de graisse avec de la cire d'abeille) [65]. L'arsenic était par la suite alors largement utilisé sous forme inorganique [66]. Le mercure et les organomercures (longtemps connus sous le nom de pesticides agricoles) ont également été utilisés pour les voiliers [67].

Depuis le début du 18^{ème} siècle, on a commencé à utiliser des feuilles de cuivre clouées sur les parties immergées de la coque de certains navires, qui ont eu le même effet et de manière plus durable. Cette solution était cependant plus onéreuse. Du plomb rouge et blanc cinabre (très toxique) pourrait être ajouté entre le cuivre et le bois afin de lutter efficacement contre les vers de terre [65]. Le tributylétain a été très utilisé entre 1960 et 1990 (dans presque tous les bateaux au cours des années 1970 [68]). Trop toxique, il laisse la place aux sels de cuivre (Cu_2O principalement). Cependant, le Cu_2O est facilement bioaccumulable [69]. Depuis 1990, le diuron et l'irgarol figurent parmi les premières solutions de remplacement des composés organostanniques. Les peroxydes qui réagissent avec l'eau de mer pour créer du peroxyde d'hydrogène et des ions métalliques solubles dans l'eau, sont d'autres solutions qui ont été testées. Les peroxydes de strontium, de calcium, de magnésium, de zinc ont donc été testés, mais ils se sont révélés beaucoup moins écologiques et souvent moins efficaces, plus coûteux ou moins durables [69-70]. A l'heure actuelle, des études menées aux États-Unis sur différents types de navires montrent qu'il existe des alternatives acceptables du point de vue économique et environnemental, y compris pour les sous-marins ou les très grands navires tels que les porte-avions, par exemple avec les copolymères organométalliques [71].

Dans l'histoire de la navigation, parmi les différentes solutions proposées, les peintures à base de copolymères auto-polissant basées sur le tributylétain (peintures TBT-SPC) constituaient le moyen le plus efficace de lutter contre le bio-encrassement des navires. On estime que l'utilisation généralisée de ces peintures couvre 70% de la flotte mondiale actuelle [72-73], ce qui a entraîné des avantages économiques significatifs [59], [74]. Malheureusement, les peintures TBT-SPC ne sont pas écologiques. Dans ce contexte, de nombreuses mesures anti-encrassement telles que des méthodes mécaniques, chimiques et biologiques sont exploitées pour lutter contre les effets du bio-encrassement mais elles ne sont aussi efficaces. Les peintures antisalissure disponibles dans le commerce, telles que le tributylétain (TBT) et le sulfate de cuivre, sont en outre hautement toxiques pour les organismes aquatiques non ciblés [75]. Le TBT contribue malheureusement au développement de la tolérance aux antimicrobiens et impose le pseudo hermaphrodisme chez les invertébrés marins [76].

En 1990, l'Organisation Maritime Internationale (OMI) a alors adopté des mesures visant à éliminer les

peintures antisalissure contenant du TBT. En octobre 2001, l'OMI a opté pour une nouvelle convention internationale sur les systèmes anti-salissures pour les navires interdisant ainsi l'utilisation d'organostanniques nocifs et a prévu un mécanisme permettant d'empêcher l'utilisation future d'autres substances nocives dans les systèmes anti-encrassements [77]. Il a ensuite été décidé qu'un bon biocide à utiliser dans un système anti-salissures doit présenter les caractéristiques suivantes : activité à large spectre, faible solubilité dans l'eau, absence de bioaccumulation dans la chaîne alimentaire, non persistant dans l'environnement de la chaîne alimentaire, compatible avec la peinture de matière première, faible toxicité chez les mammifères, bon rapport prix/performances [78].

On a récemment exploité des techniques anti-encrassements utilisant des méthodes combinant des activités d'ions de cuivre et de biocide booster (i.e. le diuron). Ces technologies souffrent malheureusement d'une durée d'efficacité limitée estimée entre 2.5 et 5 ans. Cela nécessite toutefois une enveloppe et une couverture à intervalles réguliers [77]. Dans ce contexte, des actions de prévention électrochimiques ont été entreprises. En effet, il a été constaté que les impacts environnementaux sont moindres qu'avec des revêtements anti-biocides et que la durée de vie opérationnelle est considérablement accrue. Après des essais expérimentaux de cette approche de prévention du bio-encrassement au Centre des Sciences de la Mer de Hatfield, une dégradation minimale des paramètres électrochimiques a été démontrée. En effet, pendant toute la durée de l'essai, aucune croissance d'algues n'a été observée. Cette constatation est identique à celle des revêtements biocides frais et non vieillissants (Fig. 6) [37].

Cependant, toutes les nouvelles technologies anti-salissures susmentionnées sont encore à l'essai et il n'y a pas encore assez de retour d'information pour déterminer leur impact sur l'environnement. Les principales stratégies anti-encrassement sont résumées dans le Tableau 1.

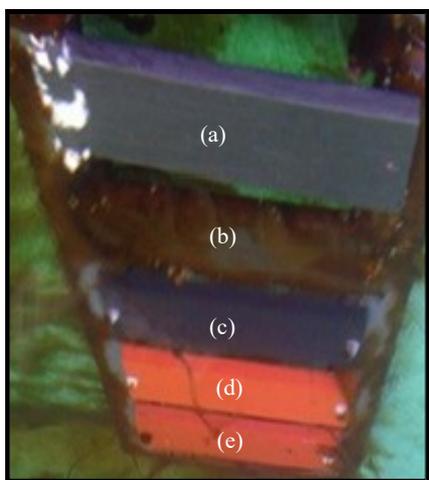


Figure 6. (a) Revêtement électrochimique vieilli avec application de puissance ; (b) Revêtement électrochimique vieilli sans puissance appliquée ; (c) Echantillons frais ; (d), (e) Revêtements biocides classiques non vieilli [37].

Après le bannissement des TBT en 2003, des recherches ont été entreprises sur des alternatives plus respectueuses de l'environnement [67], [81], [84]. Pendant cette période, d'autres espèces de métaux, comme le cuivre et le zinc, seront utilisées en tant que substituts et sont livrées selon un mécanisme technique modifié utilisant un copolymère auto-polissant (SPC) qui utilise à la fois l'hydrolyse et l'érosion pour contrôler l'activité anti-salissures. L'interaction de l'eau de mer permet l'hydrolyse du composé anti-salissant et la solubilité des revêtements laisse la surface polie. Cette dissolution contrôlée par la surface du revêtement permet d'obtenir une durée de vie plus longue [79]. En fonction de la communauté du bio-encrassement [84], la position du revêtement au niveau moléculaire est telle qu'elle permet le délogement de l'organisme [85]. Cela réduira malheureusement la durée de vie de ces alternatives anti-encrassement qui n'atteignent pas les 4 à 5 ans actuellement. Des coûts supplémentaires sont donc induits et peuvent être le double par rapport aux peintures à base de TBT. Pour augmenter leur durée de vie, la plupart des revêtements anti-salissures utilisent un procédé de fabrication spécifique [79].

5. Etude de cas : Bio-encrassement/Corrosion

5.1. Corrosion d'un prototype de système récupération d'énergie

Les systèmes de récupération des énergies marines renouvelables ayant des composants utilisant divers matériaux, il est crucial d'évaluer l'impact du bio-encrassement sur ces matériaux (Fig. 7).

Ce premier cas d'étude a été mené par le Centre National des Energies Marines Renouvelables de l'Oregon State Université d'avril 2009 à février 2010. Dans ce cas, différents matériaux d'un système typique ont été immergés. Les matrices d'essai sont constituées de coupons de 6.35cm de largeur, 5.72cm de long et 0.32 cm d'épaisseur, enrobés et non enrobés. Ils sont fixés à une plaque de fibre de verre à l'aide d'un adhésif de qualité marine. Comme le montre la Fig. 7, chaque plaque est fixée au pied d'un trépied d'instrumentation. Le but de ce trépied est de caractériser les environnements physiques et biologiques dans à des sites courants de marées [12].

5.1.1. Composite

1) *Composite en fibre de verre.* Ce matériau pourrait être utilisé pour le rotor d'une turbine, un moyeu ou une carène. Un encrassement superficiel limité est observé après 10 mois de déploiement. Une balane a adhéré au bord d'un coupon du matériel après 5 mois (Fig. 8). Il convient de mentionner que le bio-encrassement est plus courant sur les bords et les crevasses que sur les surfaces lisses. C'est la tendance générale qui a été mise en évidence dans ce cas.

2) *Composite en fibre de carbone.* Ce matériau pourrait également être utilisé pour un rotor, un moyeu ou une carène. Après 10 mois de déploiement, il y a eu un développement superficiel de bio-encrassement.

Tableau 1 : Comparaison des principaux systèmes anti-encrassement [79].

Système Anti-encrassement	Taux de Lessivage	Durée de Vie	Taux d'Erosion	Coûts (US\$/m ²) [80]	Problèmes
(TBT) auto polissant peintures au copolymère	Zone de réaction d'ablation 5µm de profondeur. Réaction chimique par hydrolyse.	4 à 5 ans [67]	< 3µm/mois [81]	\$680.884	Interdit en 2008 [82]
Copolymères auto-polissant (sans étain)	Réaction chimique par hydrolyse du cuivre, du zinc et de l'acrylate de silyle	5 années	N/D	\$1382.670	Durée de vie plus courte que les systèmes de peinture à base de TBT
Peinture conventionnelle (sans étain)	10µg/cm ² [83]	12 à 18 mois	N/D	N/D	Convient uniquement aux environnements peu encrassés [80]
Peinture de cuivre: Contrôle des polymères de déplétion	Matrice soluble, Dissolution physique	3 années	La dissolution du liant de revêtement conduit à l'érosion de la matrice	\$1.357.786	Libération non constante de biocides, auto-lissage médiocre, faible activité pendant les temps morts, coûts plus élevés en raison de la nécessité d'appliquer une couche de scellant sur les revêtements [84]. Temps de séchage lent [80]
Foul release (qui signifie : libérer l'encrassement)	Faible énergie de surface, Utilisation possible des huiles de silicone lixiviées [84]	2 à 5 ans	N/D	N/D	Nettoyage dans l'eau difficile, les revêtements anti-salissures sont sujets à l'abrasion [86]



Figure 7 : Echantillons de matériaux attachés à un trépied d'instrumentation [12].



Figure 8 : Une balane attachée au bord d'un échantillon de composite de fibres de verre [12].

5.1.2. Aluminium

Ce matériau pourrait aussi être utilisé pour un rotor d'une turbine. Dans ce cas, comme le montre la Fig. 9, sur tous les coupons en aluminium, plus de 90% des surfaces exposées ont été oxydées au cours de leur déploiement de 3 à 4 mois. Après 10 mois de déploiement en milieu marin, l'un des coins du coupon s'est rompu lors des manipulations de routine car la surface était presque complètement oxydée et affaiblie.

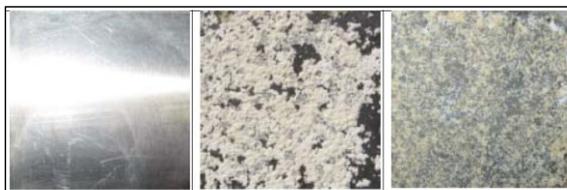


Figure 9 : Corrosion du coupon en aluminium [12].

5.1.3. Acier inoxydable

Ce matériau pourrait être utilisé pour un moyeu ou un carénage. Après 3 mois d'immersion, le support était oxydé jusqu'à un point de rupture (Fig. 10). L'échantillon testé a développé une corrosion le long de la surface de contact entre l'acier inoxydable et le panneau en fibre de verre avec une balane fixée à un bord (Fig. 11). Un autre matériau en acier inoxydable, utilisé pour la sécurité des instruments de trépied, a développé une corrosion plus sévère au cours de certains déploiements.



Figure 10 : Support de fixation en acier inoxydable [12].



Figure 11 : Corrosion des arêtes en acier inoxydable et bio-encrassement [12].

5.1.4. Acier

1) *Acier commun*. Ce matériau est couramment utilisé pour les supports de systèmes de récupération d'énergies marines. La protection d'anode en zinc vissée au centre du coupon est testée en plus de l'acier nu. Les surfaces des deux coupons étaient presque complètement oxydées après récupération. La protection anodique réduit mais n'élimine pas l'oxydation (Fig. 12).



Figure 12 : Corrosion du coupon en acier commun [11].

2) *Acier de construction*. La protection par anode en zinc vissée au centre du coupon a également été testée pour une surface nue en acier ordinaire. Dans ce cas, l'oxydation a été considérablement réduite (Fig. 13).

5.1.5. Matériaux pour les roulements

Trois types de matériaux pour roulements ont été testés en termes de bio-encrassement opérationnel. Aucun encrassement n'était visible sur une résine phénolique renforcée par des fibres ou de revêtement à faible frottement sur un support en acier inoxydable. Le polyéthylène haute densité présente un faible encrassement de la surface et des bords [12].



Figure 13 : Corrosion du coupon en acier de construction [12].

5.2. Corrosion des structures d'éoliennes offshore

Il s'agit de parcs offshore situés dans la mer Baltique. Les structures des éoliennes en question ont des dimensions typiques de 80m de hauteur, 7m de diamètre, plusieurs centimètres d'épaisseur de paroi. L'étude en question ne concerne que la structure offshore constituée des fondations, des pièces de transition, et de la tour. La figure 14 illustre le segment structurel du système offshore étudié. Il convient de mentionner dans ce cas qu'en termes d'accessibilité, qui est une question critique pour la maintenance, les structures offshore sont des systèmes à accès très restreint [87]. Dans le cas étudié, l'accessibilité par navires est considérée comme étant de l'ordre de 60% seulement [88].

Les éoliennes offshore ont une exposition significative à l'eau de mer (Fig. 15) [89-90]: 1) Une zone exposée en permanence (zone sous-marine - UZ) ; 2) une zone intermédiaire (ZI), où l'exposition à l'eau dépend de nombreux paramètres naturels et artificiels ; 3) La zone de projection (SZ), qui est une zone de projection d'eau due aux vagues. Les zones de corrosion sont classées conformément à la Fig. 15 [91]. Dans ce cas, il a été constaté que la zone de projection est soumise à une vitesse de corrosion beaucoup plus élevée que la zone sous-marine. Cet effet typique est bien connu dans le secteur pétrolier et gazier offshore [92]. Les structures offshore utilisent généralement un certain nombre de matériaux spécifiques tels que l'acier non allié et faiblement allié [93], l'acier moulé non allié et faiblement allié [94], la fonte, l'acier inoxydable, l'acier inoxydable moulé, le cuivre et les alliages de cuivre, les alliages d'aluminium, le béton armé [95-96], le plastique renforcé.

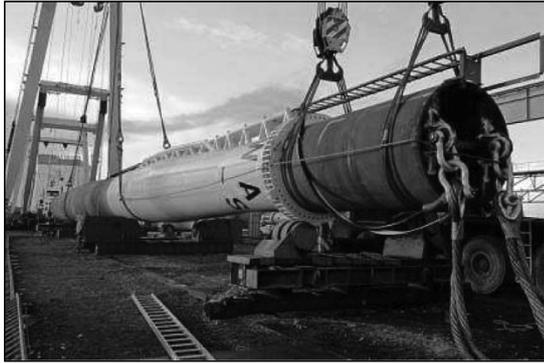


Figure 14 : Vue du système offshore étudié [87].

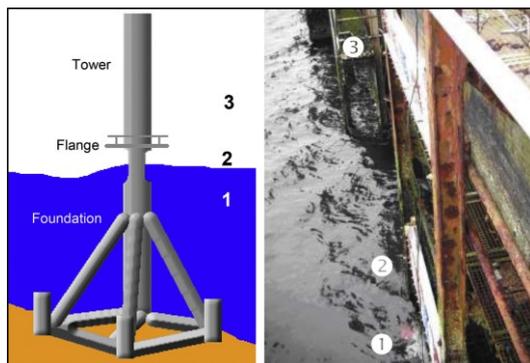


Figure 15 : Zones de corrosion des structures offshore: 1. UZ, 2. IZ, 3. SZ [91].

Les matériaux touchés par la corrosion et même ceux traités par des revêtements anticorrosion, principalement dans la zone sous-marine (sous l'eau), sont affectés par l'encrassement et le tassement des structures dû aux bactéries, aux plantes ou aux animaux. Dans ce deuxième cas d'étude, les investigations effectuées ne portaient pas sur la protection contre la corrosion mais plus sur les effets écologiques [87]. En particulier, plus de 40 espèces de biomasses ont été recensées et classées [97]. Des investigations similaires ont été menées pour les structures offshore de Nysted [98] et pour les parcs Horns Rev [99]. Dans ces structures offshore, il a été constaté que le développement de biofilms bactériens peut activer la corrosion [100]. Une corrosion, provoquée par des bactéries sulfato-réductrices colonisant un environnement anaérobie, a été observée à l'intérieur d'un monopile rempli d'eau de mer. Des effets similaires peuvent être attendus dans les fondations de structures offshore [101]. La fixation des algues, des moules, etc. sur les surfaces en acier ou sur les revêtements peut affecter les performances des systèmes de protection cathodique [87].

Il existe différents types de corrosion, en distinguant la corrosion avec et sans charge mécanique [102] : 1) Sans charge mécanique: uniforme, crevasse, piqûre, dépôt, sélectif (inter ou transgranulaire), point de rosée, corrosion par influence microbiologique (MIC), entartrage ; 2) Avec charge mécanique: Stress, fissuration, fatigue, contrainte, érosion, cavitation, fretting (usure de contact).

Le Tableau 2 résume les principaux types de corrosion des structures offshore.

5.3. L'Hydrolienne Clean Current

L'hydrolienne Clean Current a été déployée sur le site de Race Rocks dans le sud de la Colombie Britannique [103]. La figure 16 illustre la turbine carénée avant son installation en septembre 2006. Il s'agit d'une hydrolienne bidirectionnelle [104]. En raison des problèmes avec les roulements, la turbine a été retirée de l'eau en avril 2007 et a fait l'objet de réparations. Ceci a été mis à profit pour examiner le bio-encrassement et en particulier la distribution des espèces et le niveau de croissance du bio-encrassement, comme illustré sur la Fig. 17 [104]. En effet, il a été observé, qu'après cette courte période d'immersion, de nombreuses zones, telles que les pales, étaient complètement recouvertes de diatomées ou d'incrustations d'hydroïdes. Il a été ainsi mis en évidence la problématique des crevasses quant à l'établissement rapide d'organismes sur la structure [104]. Les concepteurs et développeurs d'hydroliennes devraient donc accorder une attention particulière à cet enjeu important.

Après quelques modifications et mises à niveau, la turbine a été ré-immersée en octobre 2008. Elle a finalement été retirée de l'eau en septembre 2011. La figure 18 illustre les organismes encrassant la turbine durant les trois dernières années. La macro-algue prédominante recouvrant la structure était la laminaria groelandica. Plusieurs algues rouges se développèrent également sur la structure. De très grandes bernacles ont été trouvées à la surface.



Figure 16 : Installation de l'hydrolienne Clean Current en septembre 2006 [104].



Figure 18 : Enlèvement de l'hydrolienne Clean Current en octobre 2011 [104].



Figure 17 : Enlèvement de l'hydrolienne Clean Current en avril 2007 [104].

Tableau 2 : Types de corrosions des éléments de structures offshore [87].

Type de corrosion	Eléments de la structure offshore							
	Surface de la tour (atmosphérique)	Surface de la tour (UZ)	Bride	Fondation	Corps de turbine	Rotor	Eléments de connexion	Intérieur des éléments de fondation
Uniforme	X	X	X	X	X		X	X
Fosse peu profonde	X	X	X	X	X		X	X
Piqûres								
Fente		X	X	X	X		X	
Galvanique			X	X	X		X	
Eau condensée					X			

MIC		X		X				X
Stress	X	X	X	X			X	
Erosion		X				X		

6. Conclusions et perspectives

Cet article a proposé un état de l'art qui met en évidence le phénomène du biofouling ; de sa compréhension jusqu'aux solutions de prévention. On s'est concentré sur les systèmes de récupération d'énergies marines renouvelables même si le marché des énergies marines a un développement lent, ne disposant d'aucune exploitation effective de fermes hydroliennes ou houlomotrices [105-108]. Dans ce contexte, il a été démontré qu'il existe plusieurs techniques de prévention/contrôle du bio-encrassement qui sont bien acceptées mais elles restent moins respectueuses pour l'environnement.

Des recherches et des évaluations prometteuses sont en cours. En particulier, des tests sont toujours en cours pour déterminer un anti-encrassement efficace et durable respectant l'environnement. Néanmoins, il reste des aspects importants à prendre en considération dans ces tests. En particulier, les nombreuses interactions qui se produisent lors de l'utilisation de l'anti-encrassement. Celles-ci sont principalement causées par l'environnement, le revêtement et le substrat. Les différentes interactions à prendre en compte sont résumées dans la Fig. 19, où il est noté que le substrat et l'environnement possèdent des propriétés uniques affectant l'intégrité et l'efficacité du revêtement. En outre, cette figure met en évidence les facteurs à prendre en considération concernant le revêtement de protection [110-112].

Enfin, il convient de mentionner qu'on a récemment étudié certaines applications potentielles des nanomatériaux, tels que les nanotubes de carbone et les nano-peintures dans les hydroliennes [113-114]. Les applications proposées comprennent notamment le revêtement anti-encrassement et la surveillance de l'état de la structure. En particulier dans [113], on montre que des nanoparticules de ZnO et un liant à base de résine alkyde avec des additifs non toxiques sont disponibles en tant que peinture anti-encrassement biocide.

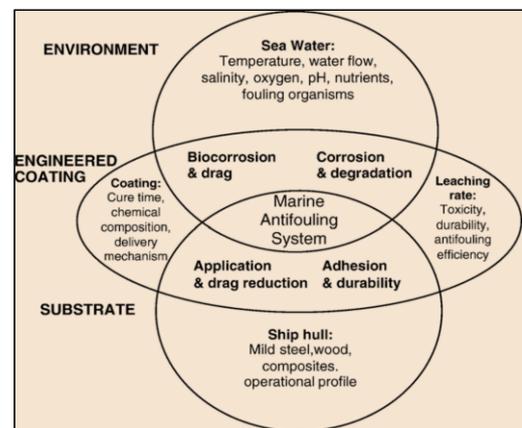


Figure 19 : Paramètres affectant un système de revêtement anti-encrassement [2], [109].

7. Références bibliographiques

- [1] J.P. Rolland and J.M. de Simone, "Synthesis and characterization of perfluoropolyether graft terpolymers for biofouling applications," *Polymeric Materials Science and Engineering*, vol. 88, pp. 606-607, 2003.
- [2] H. Titah-Benbouzid and M.E.H. Benbouzid, "Biofouling issue on marine renewable energy converters: A state of the art review on impacts and prevention," *International Journal on Energy Conversion*, vol. 5, n°3, pp. 67-78, May 2017.
- [3] <http://www.abc.net.au/rn/science/earth/stories/s24268.htm/>, 2007.
- [4] J.M. Anderson, M.J. Cima, R. Langer, R.S. Shawgo, M.S. Shive, H. von Recum and G. Voskerician, "Biocompatibility and biofouling of MEMS drug delivery devices", *Biomaterials*, vol. 24, n°11, pp. 1959-67, 2003.
- [5] M. Kolari, "Attachment mechanisms and properties of bacterial biofilms on non-living surfaces", *Dissertationes Biocentri Viikki Universitatis Helsingiensis*, vol. 12, pp.129, 2003.
- [6] J.A. Callow, M.E. Callow, "Trends in the development of environmentally friendly fouling-resistant marine coatings", *Nature Communications*, vol. 2, n°244, 2011.
- [7] T. Gehrke and W. Sand, "Interactions between microorganisms and physicochemical factors cause MIC of steel pilings in harbours", *NACE International Corrosion*, pp. 8, 2003.
- [8] Biofouling formation and remedial measures, <http://www.parliament.vic.gov.au/enrc/default.htm/>, 2004.

- [9] <http://environment.blogspot.fr/2008/11/biofouling.html>, 2008.
- [10] C. Hellio, D. Yebra, M. Apolinario and R. Coutinho, *Advances in Marine Antifouling Coatings and Technologies*, Understanding the Biofouling of Offshore and Deep-Sea Structures, Ed. Woodhead Publishing, Cambridge, UK, p. 132, 2009.
- [11] F. Mineur, E.J. Cook, D. Minchin, K. Bohn, A. MacLeod and C.A. Maggs, "Changing coasts: Marine aliens and artificial structures," *Oceanography and Marine Biology*, vol. 50, pp. 189-234, 2012.
- [12] B. Polagye and J. Thomson, "Screening for biofouling and corrosion of tidal energy device materials," *Northwest National Marine Renewable Energy Center*, Oregon State University, Report 1, April 2010.
- [13] M. Wahl, "Marine epibiosis. I. Fouling and antifouling: some basic aspects," *Marine Ecology Progress Series*, vol. 58, pp.175-189, 1989.
- [14] R. Baier, *Early Events of Micro-Fouling of all Heat Transfer Equipment*. In E.F.C. Somerscales and J.G. Knudsen, (Ed.) *Fouling of Heat Transfer Equipment*. Hemisphere Publishing Corporation, Washington, pp. 293-304, 1981.
- [15] S.C. Dexter, "Influence of substrate wettability on the formation of bacterial slime films on solid surfaces immersed in natural sea water," in *Proceedings of the 1977 International Congress of Marine Corrosion and Fouling*, Boulogne (France), pp. 137-144, 1977.
- [16] S.C. Dexter, "Influence of substratum critical surface tension on bacterial adhesion - In situ studies," *Journal of Colloid and Interface Science*, vol. 70, pp. 346-354, 1978.
- [17] M. Fletcher, G.I. Loeb, "Influence of substratum characteristics on the attachment of a marine pseudomonad to solid surfaces," *Applied and Environmental Microbiology*, vol. 37, pp. 67-72, 1979.
- [18] D.R. Walt, J.B. Smulow, S.S. Turesky and R.G. Hill, "The effect of gravity on initial microbial adhesion," *Journal of Colloid and Interface Science*, vol. 107, n°2, pp. 334-336, 1985.
- [19] K.C. Marshall. "Mechanisms of adhesion of marine bacteria to surfaces," in *Proceedings of the 1972 International Congress of Marine Corrosion and Fouling*, National Bureau of Standards, Gaithersburg.
- [20] W.A. Corpe, L. Matsuuchi and B. Armbruster, "Secretion of adhesive polymers and attachment of marine bacteria to surfaces," in *Proceedings of the 1976 International Biodeterioration Symposium* London (UK), pp. 433-442 1976.
- [21] A. J. Wicken, *Bacterial Cell Walls and Surfaces*. In: D.C. Savag, M. Fletcher, (Ed.) *Bacterial Adhesion*. Plenum Publishing Corporation, New York, pp. 45-70, 1985.
- [22] M. Fletcher and S. McEldowney, "Microbial attachment to nonbiological surfaces," in *Proceedings of the 1984 International Symposium of Microbiology and Ecology*, Detroit (USA), pp. 124-129, 1984.
- [23] L.J. Douglas. "Adhesion of pathogenic *Candida* species to host surfaces," *Microbiology Science*, vol. 2, n°8, pp. 243-247, 1985.
- [24] T.R. Tosteson, R. Revuelta, B.R. Zaidi, S.H. Imam and R.F. Bard, "Aggregation-adhesion enhancing macromolecules and the specificity of marine microbial surface interactions," *Journal of Colloid and Interface Science*, vol. 104, n°1, pp.60-71, 1983.
- [25] D. Kirchman, S. Graham, D. Reish and R. Mitchell, "Lectins may mediate in the settlement and metamorphosis of *Janua* (*Dexiospira*) *brasilienis* Grube (Polychaeta: Spirorbidae)," *Marine Biology Letters*, vol. 3, pp. 131-142, 1982.
- [26] K.C. Marshall, R. Stout and R. Mitchell, "Mechanisms of the initial events in the sorption of marine bacteria to surfaces," *Journal of General Microbiology*, vol. 68, pp. 337-348, 1971.
- [27] W.A. Corpe, *Attachment of Marine Bacteria to Solid Surfaces*. In: R.S. Manly, (Ed.) *Adhesion in Biological Systems*, Academic Press, London, pp. 73-87, 1970.
- [28] T.R. Cuba and N.J. Blake, "The initial development of a marine fouling assemblage on a natural substrate in a subtropical estuary," *Botanica Marina*, vol. 26, pp. 259-264, 1983.
- [29] B. Cooksey, K.E. Cooksey, C.A. Millar, J.H. Paul, R. Rubin and D. Webster. *The Attachment of Microfouling Diatoms*. In: J.D. Costlow, R.C. Tipper, (Ed.) *Marine Biodetermination: An Interdisciplinary Study*. E. & F.N. Spon Ltd, London, pp. 167-172, 1984.
- [30] S. Ferreira and U. Seeliger, "The colonization process of algal epiphytes on *Ruppia maritima* L.," *Botanica marina*, vol. 28, pp. 245-249, 1985.
- [31] Y. Cuomo, F. Vanzanella, E. Fresi, F. Cinelli and L. Mazzella, "Fungal flora of *Posidonia oceanica* and its ecological significance," *Transactions of the British Mycological Society*, vol. 84, n°1, pp. 35-40, 1985.
- [32] J.H. Connell and R.O. Slatyer, "Mechanisms of succession in natural communities and their role in community stability and organization," *The American Naturalist*, vol. 111, pp. 1119-1144, 1977.
- [33] A.I. Railkin, *Marine Biofouling: Colonization Processes and Defenses*. CRC Press, Boca Raton 2003.
- [34] T.A. Potts and A.W. Hulbert, "Structural influences of artificial and natural habitats on fish aggregations in Onslow Bay, North Carolina," *Bulletin of Marine Science*, vol. 55, n°2-3, pp. 609-622, 1994.
- [35] R.E. Spieler, D.S. Gilliam and R.L. Sherman, "Artificial substrate and coral reef restoration: What do we need to know to know what we need?," *Bulletin of Marine Science*, vol. 69, pp. 1013-1030, 2001.
- [36] O. Langhamer, D. Wilhelmsson and J. Engström, "Artificial reef effect and fouling impacts on offshore wave power foundations and buoys – A pilot study estuarine," *Coastal and Shelf Science*, vol. 82, pp. 426-432, 2009.
- [37] A. von Jouanne, T. Brekken, T. Lettenmaier, E. Amon, S. Moran and A. Yokochi, "Wave energy industry research and ocean testing solutions to advance the wave energy industry," in *Proceedings of the 2014 IEEE PESGM*, Washington (USA), pp. 1-5, July 2014.
- [38] A. Theophanatos and J. Wolfram, "Hydrodynamic loading on macro-roughened cylinders of various

- aspect ratios”, *Journal of Offshore Mechanics and Arctic Engineering*, vol.111, pp. 214-222, 1989.
- [39] I. Jusoh and J. Wolfram, “Effects of marine growth and hydrodynamic loading on offshore structures, *Jurnal Mekanikal*, vol. 1, pp. 77-96, 1996.
- [40] W. Shi, H.C. Park, J.H. Baek, C.-W. Kim, Y.C. Kim and H.K. Shin, “Study on the marine growth effect on the dynamic response of offshore wind turbines”, *International Journal of Precision Engineering and Manufacturing*, vol.13, pp. 1167-1176, 2012.
- [41] M. Eriksson, J. Isberg and M. Leijon, “Hydrodynamic modelling of a direct drive wave energy converter,” *International Journal of Engineering Science*, vol. 43, pp.1377-1387, 2005.
- [42] A.K.A. Macleod, “De-risking structural loading calculations for marine renewable energy devices”, *NERC Internship Placement Scheme Report: Marine Renewable Energy, Science of the Environment*, May 2013.
- [43] R.E. Harris, L. Johanning and J. D. Wolfram, “Mooring systems for wave energy converters: a review of design issues and choices,” in *Proceedings of the 2004 MAREC*, Blyth (UK), pp. 1-10, July 2004.
- [44] P.K. Kundu and I.M. Cohen, *Fluid Mechanics. Elsevier Academic Press*, London, 2004.
- [45] M. Leijon, O. Danielsson M. Eriksson, K. Thorburn, H. Bernhoff, J. Isberg, J. Sundberg, I. Ivanova, E. Sjostedt, O. Agren, K.E. Karlsson and A. Wolfbrandt, “An electrical approach to wave energy conversion,” *Renewable Energy*, vol. 31, pp. 1309-1319, 2006.
- [46] Regional Coastal Monitoring Programmes, http://www.channelcoast.org/gallery/viewphoto/equipment/oceanographic_instruments/directional_waverider/1751/, 2014.
- [47] O. Langhamer, Colonization of Blue Mussels (*Mytilus edulis*) on Offshore Wave Power Installations. In *Biofouling: Types, Impacts and Anti-Fouling*, pp. 295-308. Nova Science Publishers, 2010.
- [48] P.L. Fraenkel. “Power from marine currents,” *Proc. IMech Part A-Journal of Power and Energy*, vol. 216, pp. 1-14, 2002.
- [49] K.W. Ng, W.H. Lam, K.C. Ng, “2002-2012: 10 years of research progress in horizontal-axis marine current turbines,” *Energies*, vol. 6, pp. 1497-1526, 2013.
- [50] J.A.C. Orme, I. Masters and R. T. Griffiths, “Investigation of the effect of biofouling on the efficiency of marine current turbines,” in *Proceedings of the 2001 MAREC*, Newcastle (UK), pp. 91-99, March 2001.
- [51] W.M.J. Batten, A.S. Bahaj, A.F. Molland, J.R. Chaplin, “The prediction of the hydro-dynamic performance of marine current turbines,” *Renewable Energy*, vol. 33, pp. 1085–1096, 2008.
- [52] J.M. Walker, K.A. Flack, E.E. Lust, M.P. Schult and L. Luznik, “Experimental and numerical studies of blade roughness and fouling on marine current turbine performance,” *Renewable Energy*, vol. 66, pp. 257-267, 2014.
- [53] R.P.J.O.M. van Rooij and WA. Timmer, “Roughness sensitivity considerations for thick rotor blade airfoils,” *Transactions of the American Society of Mechanical Engineers, Journal of Solar Energy Engineering*, vol. 125, n°4, pp. 468–78, 2003.
- [54] WA. Timmer and P. Schaffarczyk, “The effect of roughness at high Reynolds numbers on the performance of Aerofoil DU 97-W-300Mod,” *Wind Energy*, vol. 7, pp. 295–307, 2004.
- [55] W.M.J. Batten, A.S. Bahaj, A.F. Molland and J.R. Chaplin, “The prediction of the hydrodynamic performance of marine current turbines,” *Renewable Energy*, vol. 33, pp. 1085–1096, 2008.
- [56] S. Durr and J. Thomason, Ed. *Biofouling*. Chap. 19, pp. 267-287, Wiley-Blackwell, West Sussex, 2010.
- [57] M. Mueller and R. Wallace, “Enabling science and technology for marine renewable energy,” *Energy Policy*, vol. 36, pp. 4376-4382, 2008.
- [58] A.K.A. Macleod, “De-risking structural loading calculations for Marine Renewable Energy Devices”, *NERC Internship Placement Scheme Report*, B.Sc. University of Aberdeen-MSc Heriot-Watt University, May 2013.
- [59] A. Abbott, P.D. Abel, D.W. Arnold, A. Milne, “Cost-benefit analysis of the use of TBT: The case for a treatment approach,” *Science of the Total Environment*, vol. 258, pp. 5-19, 2000.
- [60] A.M. Rouhi, “The squeeze of tributyltin,” *Chemical and Engineering News*, vol. 27, pp. 41-42, 1998.
- [61] J.J. Cooney and R.J. Tang, “Copper oxide impregnated textiles with potent biocidal activities,” *Methods in Enzymology*, vol. 310, pp. 637-645, 1999.
- [62] M.S. Brancato, “Impacts of invasive species introduced through the shipping industry,” in *Proceedings of the 1999 MTS/IEEE OCEANS*, Seattle (USA), vol. 2, no. 2, pp. 676, September 1999.
- [63] K. Reise, S. Gollasch and W.J. Wolff, “Introduced marine species of the North Sea coast,” *Helgoländer Meeresunters*, vol. 52, pp. 219-234, 1999.
- [64] http://gdt.oqlf.gouv.qc.ca/ficheOqlf.aspx?Id_Fiche=8360101/, 2014.
- [65] http://www.apmb-brest.fr/spip.php?page=articleimprim&id_article=99/, 2011.
- [66] N.I. Kopylov, Y.M. Kaplin, V.P. Litvinov and Y.D. Kaminskii, “Large-scale use of arsenic in the production of antifouling coatings,” *Environmental Problems*, vol. 41, n°5, pp. 780-785, 2007.
- [67] International Maritime Organization, 2011: <http://www.imo.org/About/Conventions/ListOfConventions/Pages/International-Convention-on-the-Control-of-Harmful-Anti-fouling-Systems-on-Ships-%28AFS%29.aspx>
- [68] International Maritime Organization, 2002: http://www5.imo.org/SharePoint/blastDataHelper.asp/data_id%3D7986/FOULING2003.pdf/
- [69] S. M. Olsen, L.T. Pedersen, M.H. Hermann, S. Kiil and K. Dam-Johansen, “Inorganic precursor peroxides for antifouling coating,” *Journal of Coatings Technology and Research*, vol. 6, n°2, pp. 187-199, 2009.

- [70] S. Manzo, S. Buono and C. Creminisi, "Toxic effects of irgarol and diuron on sea urchin *Paracentrotus lividus* early development, fertilization, and offspring quality," *Archives of Environmental Contamination and Toxicology*, vol. 51, n°1, 2006.
- [71] United States Naval experience with antifouling paints, 2008: http://www.paintsquare.com/library/articles/PCE2000_conf_Kaznoff.pdf/
- [72] U. Gerigk, U. Schneider and U. Stewen, "The present status of TBT copolymer antifouling paints versus TBT-free technology," *American Chemical Society, Division of Environmental Chemistry*, vol. 38, n°1, pp. 91-94, 1998.
- [73] M.A. Champ, "The Status of the treaty to ban TBT in marine antifouling paints and alternatives," in *Proceedings of the 2001 UJNR (US/Japan) Marine Facilities Panel Meeting*, Hawaii (USA), November 2001.
- [74] M.A. Champ, "A review of organotin regulatory strategies, pending actions, related costs and benefits," *Science of the Total Environment*, vol. 258, pp. 21-71, 2000.
- [75] C. Anderson, "TBT-free anti-fouling coatings in 2003: For better or for worse?," *Corrosion Management*, vol. 40, n°1, pp. 21-24, 2002.
- [76] B.S. Smith, "Male characteristics on female mud snails caused by antifouling bottom paints," *Journal of Applied Toxicology*, vol. 1, n°1, pp. 22-25, 1981.
- [77] International Maritime Organization, 2002: <http://www.imo.org/OurWork/Environment/AntifoulingSystems/Pages/Default.aspx/>
- [78] S.L. Tong, F.Y. Pang, S.M. Phang and H.C. Lai, "Tributyltin distribution in the coastal environment of peninsular Malaysia," *Environmental Pollution*, vol. 91, n°2, pp. 209-216, 1996.
- [79] L.D. Chambers, K.R. Stokes, F.C. Walsh and R.J.K. Wood, "Modern approaches to marine antifouling coatings," *Surface and Coatings Technology*, vol. 201, pp. 3642-3652, 2006.
- [80] A. Terlizzi, S. Frascchetti, P. Gianguzza, M. Faimali and F. Boero, "Environmental impact of antifouling technologies: State of the art and perspectives," *Aquatic Conservation: Marine and Freshwater Ecosystems*, vol.11, n°4, pp. 311-317, 2001.
- [81] I. Omae, "Organotin antifouling paints and their alternatives," *Applied Organometallic Chemistry*, vol. 17, n°2, pp. 81-105, 2003.
- [82] J. Lewis, "Hull fouling as a vector for the translocation of marine organisms: Report 1 and 2," Dept. of Agriculture, Fisheries and Forestry - Australia, *Marine Science and Ecology Pty. Ltd.*, Australia, 2002.
- [83] G. Swain, "Accelerated testing of antifouling coatings for use on offshore structures," in *Proceedings of the 1986 MTS/IEEE*, Washington (USA), pp. 221-226, September 1986.
- [84] D.M. Yebra, S. Kiil and K. Dam-Johansen, "Antifouling technology-past, present and future steps towards efficient and environmentally friendly antifouling coatings," *Progress in Organic Coatings*, vol. 50, pp. 75-104, 2004.
- [85] R.F. Brady Jr. and I.L. Singer, "Mechanical factors favoring release from fouling release coatings," *Biofouling*, vol. 15, pp. 73-81, 2000.
- [86] J.A. Lewis, "Proceedings: National Shipping Industry Conference," *Australian Maritime Safety Authority*, Canberra (Australia), March 2001.
- [87] A. Momber, "Corrosion and corrosion protection of support structures for offshore wind energy devices (OWEA)," *Materials and Corrosion*, vol. 62, n° 5, 2011.
- [88] D.T. Griffith, N. Yoder, B. Resor, J. White, J. Paquette, A. Ogilvie and V. Peters, "Prognostic control to enhance offshore wind turbine operations and maintenance strategies," in *Proceedings of the 2012 EWEA*, Copenhagen (Denmark), pp. 1-12, April, 2012.
- [89] ISO 20340. Performance requirements for protective paint systems for offshore and related structures. Geneva, Switzerland: International Organization for Standardization, 2009.
- [90] ISO 12944-2. Paints and varnishes-corrosion protection of steel structures by protective paint systems-part 2: classification of environments. Geneva, Switzerland: International Organization for Standardization, 1998.
- [91] A.W. Momber, P. Plagemann and V. Stenzel, "Performance and integrity of protective coating systems for offshore wind power structures after three years under offshore site conditions," *Renewable Energy*, vol. 74, pp. 606-617, 2015.
- [92] J.P. Ault, "The use of coatings for corrosion control on offshore oil structures," *Journal of Protective Coatings and Linings*, vol. 23, n°4, p. 42-46, 2006.
- [93] F. Martin and F. Schröder, "Stahlösungen für offshore-windkraftanlagen," *Stahlbau*, vol. 74, n°6, pp. 435, 2005.
- [94] F. Lüddecke, W. Rücker, M. Seidel and J. Assheuer, "Tragverhalten von stahlgussbauteilen in offshore-windenergie-anlagen unter vorwiegend ruhender und nicht ruhender Beanspruchung," *Stahlbau*, vol. 77, n°9, pp. 639, 2008.
- [95] M. Dobrowolski, Presentation at *Windforce 09 – Direction Offshore*, Bremerhaven (Germany), July 2009.
- [96] S. Martens, Presentation at *Windforce 09 – Direction Offshore*, Bremerhaven (Germany), July 2009.
- [97] D. Wilhelmsson and T. Malm, "Fouling assemblages on offshore wind power plants and adjacent substrata," *Estuarine, Coastal and Shelf Science*, vol. 79, pp. 459, 2008.
- [98] J. Birklund and A.H. Petersen, "Development of the fouling community on turbine foundations and scour protections in Nysted offshore wind farm," *Survey Report, Energi E2 A/S*, Copenhagen (Denmark), 2004.
- [99] R. Frederiksen, M. Bech and S.B. Leonhard, "Hard bottom substrate monitoring Horns Rev offshore wind farm," *Survey Report No. 1, Energi E2 A/S*, Fredericia (Denmark), 2004.

- [100] H. van der Mijle Meijer, "Corrosion in offshore wind energy – A major issue," in *Proceedings of the 2009 Offshore Wind Power Conference*, Den Helder (Netherlands), February 2009.
- [101] Klassifikations und Bauvorschriften, Teil VI-10: Richtlinien für Korrosionsschutz und Beschichtungssysteme, Ausgabe, Germanischer Lloyd AG, Hamburg (Germany), 2010.
- [102] DIN EN ISO 8044, Korrosion von Metallen und Legierungen – Grundbegriffe und Definitionen, Deutsches Institut für Normung, Berlin (Germany), December 1999.
- [103] G. Bhuyan, G. Darou, C. Blondeau and M. Edmunds, *Integrated Tidal Current Demonstration Project at Race Rocks, British Columbia, Canada*. European Commission Coordinated Action on Ocean Energy (CA-OE), Copenhagen (Denmark), April 2007.
- [104] RaceRocks.com, "Renewable Energy for Race Rocks," RaceRocks.com, [Online]. Available: <http://www.racerocks.com/racerock/energy/tidalenergy/tidalenergy.htm> [Accessed July 2016].
- [105] M.E.H. Benbouzid, J.A. Astolfi, S. Bacha, J.F. Charpentier, M. Machmoum, T. Maître et D. Roye, *Concepts, Modeling and Control of Tidal Turbines, Marine Renewable Energy Handbook*, Chap. 8, p. 219-278, ISBN: 978-1-84821-332-6, Wiley, ISTE, Paris 2011.
- [106] H. Titah-Benbouzid and M.E.H. Benbouzid, "An up-to-date technologies review and evaluation of wave energy converters," *International Review of Electrical Engineering*, vol. 10, n°1, pp. 52–61, January-February 2015.
- [107] Z. Zhou, M.E.H. Benbouzid, J.F. Charpentier, F. Sculler and T. Tang, "Developments in large marine current turbine technologies – A review," *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 77, pp. 852–858, May 2017.
- [108] H. Chen, T. Tang, N. Aït-Ahmed, M.E.H. Benbouzid, M. Machmoum and M.E.H. Zaïm, "Attraction, challenge and current status of marine current energy," *IEEE Access*, vol. 6, pp. 12665–12685, 2018.
- [109] L. Hoipkemeier-Wilson, J.F. Schumacher, M.L. Carman, A.L. Gibson, A.W. Feinberg, M.E. Callow, J.A. Finlay, J. A. Callow, and A.B. Brennan, "Adhesion and motility of fouling diatoms on a silicone elastomer," *Biofouling*, vol. 20, n°6, pp. 323-329, 2004.
- [110] H. S. Preiser, A. Ticker, G. S. Bohlander, D. W. Taylor in: J. D. Costlow and R. C. Tipper (Eds.), *Marine Biodeterioration: An Interdisciplinary Study*, Naval Institute Press, MD, USA, p. 223, 1984.
- [111] R.A. Devilla, M.T. Brown, M. Donkin, G.A. Tarran, J. Aiken and J.W. Readman, "Impact of antifouling booster biocides on single microalgal species and on a natural marine phytoplankton community," *Marine Ecology Progress Series*, vol. 286, pp. 1-12, 2005.
- [112] L.S. Shtykova, D. Ostrovskii, P. Handa, K. Holmberg and M. Nydén, "NMR Diffusometry and FTIR in the study of the interaction between antifouling agent and binder in marine paints," *Progress in Organic Coatings*, vol. 51, pp. 125, 2004.
- [113] H.E. Yong, K. Krishnamoorthy, K.T. Hyun and S.J. Kim, "Preparation of ZnO nanopaint for marine antifouling applications," *Journal of Industrial and Engineering Chemistry*, vol. 29, pp. 39-4225, September 2015.
- [114] K.W. Ng, W.H. Lam and S. Pichiah, "A review on potential applications of carbon nanotubes in marine current turbines," *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 28, pp. 331-339, December 2013.

Stage CERPEP : L'éolien en LGT et LP

Aï Lan BUI VAN⁽¹⁾, Jean MEUNIER⁽¹⁾, Jean-Michel GAY⁽²⁾, Jean-Philippe ILARY⁽²⁾
Enseignants de Physique Appliquée⁽¹⁾ – d'électrotechnique⁽²⁾
Lycée Jules FERRY -78000 VERSAILLES

Résumé : Nous avons participé à la semaine de formation sur l'éolien dans le lycée Technique de Fécamp du lundi 02 juillet 2018 au vendredi 6 juillet 2018. Des professionnels du secteur éolien et des enseignants du BTS Maintenance des systèmes option Eolien ont animé cette semaine très riche techniquement. Nous proposons de présenter les thématiques abordés durant les diverses présentations afin de vous donner l'envie d'y participer.

Présentation

Le CMQ3E (Campus des métiers et des qualifications) organise ce stage de formation aux technologies de l'éolien. Ce stage est inscrit au programme national CERPEP.

L'objectif de ce stage est de diffuser des connaissances et de développer des compétences, scientifiques et technologiques, transférables dans les activités pédagogiques des filières technologiques ou professionnelles sur la thématique de l'éolien.

Cette formation CERPEP disponible sur GAIA est destinée tant aux enseignants préBAC que postBAC. Notre groupe était composé de 11 personnes originaires d'IUT, de BTS Electrotechnique (GE et Physique Appliquée), de BTS Maintenance des systèmes Eolien/Production, et de S-SI et de BacPRO.

Les présentations, d'une durée de 2h chacune, permettent de balayer l'ensemble des problématiques liées à l'éolien.

Le stage débute le lundi à 13h et se termine le vendredi à 12h. Les journées sont bien remplies !

Lundi 02 juillet

Après l'accueil, une présentation d'introduction présentant le **panorama** du mix-énergétique (énergie primaire/finale, Géothermie, etc.)

Ensuite, un exemple d'**activité pratique** nous est proposé. A partir des données de production d'une éolienne, il est demandé, à l'aide du logiciel excel, d'extraire des informations de façon pertinente. Le fichier correspond à un relevé de grandeurs toutes les 10 min pendant une année. Les premières caractéristiques de performances des éoliennes sont déduites de ce travail.

Mardi 03 juillet

La première intervention porte sur un **état de l'Art de la technologie éolienne**. Ces importantes informations permettent de bien identifier tous les acteurs de l'éolien, tant technique, humain et industriel. Ces trois premières présentations permettent, même à un collègue aguerri, de disposer des dernières technologies, grandeurs de ce domaine d'activité.

L'intervenant de chez Nordex aborde la partie « administrative » de l'implantation d'un parc éolien.

L'après-midi, deux enseignants chercheurs du GREAH nous ont présenté deux axes de leur travail ; pour commencer une présentation sur certaines régulations mises en œuvre dans l'éolienne.

Ensuite, un **état de l'Art sur l'architecture et la conception des génératrices** supérieures au MW. Ces informations, très rares à trouver, ont principalement portées sur la conception par aimants des machines afin de supprimer le multiplicateur généralement associé.

Mercredi 04 juillet

La journée a débuté par la présentation d'un industriel spécialisé dans la fabrication de pales d'éolienne de plusieurs mégawatts.

Ensuite, c'est un spécialiste de la **fabrication de mât**, qui développa les différentes structures envisageables et plus particulièrement les mâts en béton.

L'après-midi, équipé de nos chaussures de sécurité, nous avons effectué 3 activités :

- **Travail en hauteur** : il nous a fallu monter à 4m (sur une éolienne 80m) en respectant les règles de sécurité sur deux types d'échelles et utilisant divers moyens de sécurité.
- **Visite d'une nacelle** d'éolienne de 700 kW
- Présentation de 4 activités réalisées au sein de l'établissement autour de l'éolienne et étude de l'éolienne « démontée » présente dans l'atelier.

Judi 05 juillet

Réalisation d'une ou plusieurs activités présentées la veille.

Présentation et exploitation de bases de données météorologiques permettant d'effectuer des calculs prévisionnels de performances d'éoliennes de différents constructeurs.

L'après-midi, nous nous sommes rendus sur le **centre de maintenance** de la société Nordex. Nous avons pu apprécier le logiciel SCADA utilisé pour organiser les maintenances des éoliennes. Mais aussi, on nous a présenté certains matériels de rechange présent dans les stocks.

Par ailleurs, il nous été décrit le quotidien d'un technicien en maintenance éolienne. Le secteur est

porteur est à la recherche de techniciens compétents et en excellente forme physique.

Enfin, en soirée, *visite du mât de mesure* off-shore présent sur le futur parc éolien off-shore de Fécamp. Pour s'y rendre, nous sommes montés à bord d'un vieux gréement.

Vendredi 06 juillet

Durant cette matinée, on nous parle du futur Parc Off-Shore de Fécamp ainsi que de celui de Dieppe-Le Tréport. De l'importance des études d'impact : de la faune, de la flore, des sols, des riverains. Du travail de patience et de prospective qui est mis en œuvre pour chaque projet.

Enfin, l'accent a été mis sur l'immensité de l'échelle de ces projets : des dizaines d'éoliennes de 8 MW, de 700 tonnes chacune, pour quelques milliards d'investissement par parc ... Des techniques de pointe sont développées aussi bien pour la conception, que pour l'industrialisation et l'installation de ces « monstres ».

La formation technologique s'est terminée par une formation gastronomique, le ddfpt du lycée nous ayant préparé une table de spécialités normandes.

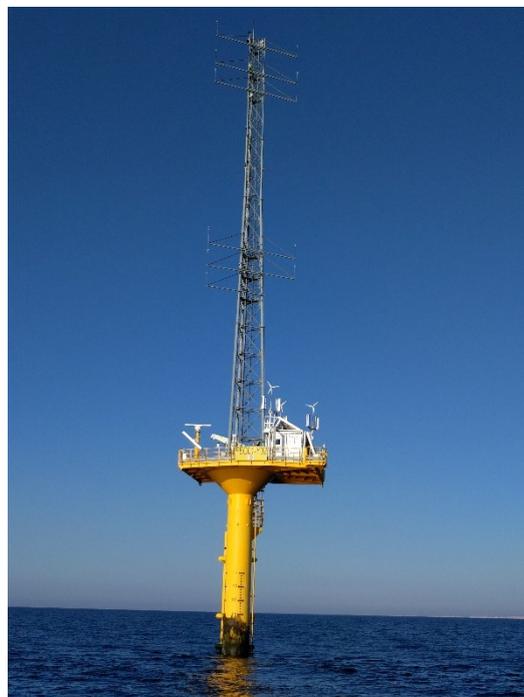
Il nous restait plus qu'à remercier nos hôtes pour l'accueil qui nous fut réservé et la qualité des prestations des intervenants de cette manifestation.



Nacelle dans la cour du lycée



Ateliers du lycée



Mat de mesure sur le futur site du parc

Abonnez-vous à *La* Revue 3E.I



ENSEIGNER L'ÉLECTROTECHNIQUE ET L'ÉLECTRONIQUE INDUSTRIELLE



La Revue 3E.I,
une publication pédagogique
de la SEE

- Outil didactique pour les filières préparant à l'enseignement technique
- Trame indispensable à la formation continue des hommes de terrain
- 4 N° par an : Janvier, Avril, Juillet, Octobre



La revue 3E.I :
3 dossiers par an, très complets,
sur des sujets d'actualité
+ 1 N° Pratique pédagogique

Dossiers thématiques prévisionnels

- Le Génie Electrique dans les procédés
- Cybersécurité (partie 2)
- Stockage de l'Energie Electrique
- Numéro pédagogique / jeunes chercheurs

La Revue 3E.I est une publication trimestrielle de la SEE. Les sommaires des derniers numéros sont disponibles sur le site www.see.asso.fr/3ei



BULLETIN D'ABONNEMENT 2019

A retourner à la SEE - Service Abonnements, 17 rue de l'Amiral Hamelin 75783 Paris cedex 16 - France +33 1 56 90 37 17 - abo@see.asso.fr

ABONNEMENT 3E.I 2019 - PLEIN TARIF	INDIVIDUEL		INSTITUTIONNEL (BIBLIOTHÈQUE/LABORATOIRE)	
	France & UE	Hors UE	France & UE	Hors UE
FORMULE DUO (papier + numérique) Accès numérique 3E.I	42 € TTC	51,12 € HT	60 € TTC	68,74 € HT
	France & UE : 30 € TTC		Hors UE : 29,37 € HT	
FORMULE PREMIUM : Adhésion SEE + Tarif préférentiel à la revue 3E.I format papier + Accès numérique aux revues 3E.I et REE + Tarifs préférentiels conférences et journées d'études				
	Standard	Retraités, enseignants, jeunes actifs (< 35 ans)	Etudiants, en recherche d'emploi	
Adhésion SEE	125 € TTC	65 € TTC	15 € TTC	
+ Abonnement 3E.I version papier	France & UE : 39 € TTC		Hors UE : 48,18 € HT	

TVA de la revue 3E.I : 2,1%. Adhésion collective possible via des conventions de partenariat - Contactez-nous à : sg@see.asso.fr

MES COORDONNÉES		Prénom :	Nom :
ADRESSE DE LIVRAISON		ADRESSE DE FACTURE (Si différente)	
Adresse :		<input type="checkbox"/> Je joins le bon de commande administratif N° : et je désire recevoir une facture au nom de mon employeur pour paiement à réception	
Code postal :	Pays :	Raison sociale de l'employeur :	
Ville :		Service :	Activité (facultatif) :
Tél. :		Adresse :	
e-mail* :		Code postal :	Ville :
* Obligatoire		Pays :	N° TVA :
MON RÉGLEMENT		N° TVA intracommunautaire : obligatoire pour règlement HT en UE Hors de France	
Je règle la somme de _____ €		e-mail* :	
par <input type="checkbox"/> Chèque à l'ordre de la SEE		* Obligatoire	
<input type="checkbox"/> Carte bancaire (Visa, Eurocard/Mastercard)		Date	
N° Carte		Signature (mentions obligatoires) et cachet si il y a lieu :	
Date de validité	N° cryptogramme (3 derniers chiffres au dos de la carte)		

Conformément aux dispositions légales et réglementaires en matière de données personnelles, les informations recueillies sur ce formulaire sont enregistrées dans un fichier informatisé par la SEE (Société de l'électricité, de l'électronique et des technologies de l'information et de la communication) pour la mise en place et le suivi de l'abonnement souscrit ainsi que pour l'envoi de courriers, e-mails de réabonnements et informations concernant la SEE et ses activités. Elles sont conservées et sont destinées à être utilisées par la SEE et les prestataires techniques de la SEE afin de permettre la bonne réception du magazine et d'assurer le service client. Vous pouvez exercer votre droit d'accès aux données vous concernant par courrier : SEE - Service abonnements 17 rue de l'Amiral Hamelin 75783 Paris Cedex 16 ou par le formulaire de contact du site web : www.see.asso.fr



ABONNEMENT + RAPIDE : www.see.asso.fr

Abonnez-vous à la



BULLETIN À COMPLÉTER ET RENVOYER :
SEE - 17 rue de l'Amiral Hamelin - 75783 Paris cedex 16 - France
01 56 90 37 17 - abo@see.asso.fr

QUATRE FORMULES AU CHOIX


 VERSION PAPIER

5 numéros : mars, mai, juillet, octobre, décembre.
Distribution postale

France & UE	Hors UE
<input type="checkbox"/> 125 € TTC	<input type="checkbox"/> 132,43 € HT


 VERSION NUMÉRIQUE

Accès aux publications numériques
ouvert pendant un an à compter
de la date de souscription

France & UE	Hors UE
<input type="checkbox"/> 90 € TTC	<input type="checkbox"/> 88,15 € HT


 VERSION DUO

Version imprimée
+ version numérique

France & UE	Hors UE
<input type="checkbox"/> 155 € TTC	<input type="checkbox"/> 161,81 € HT

 VERSION PREMIUM

- > Adhésion SEE avec accès eREE
- + Tarif préférentiel à la revue REE format papier
- + Accès numérique aux revues 3E.I et REE
- + Tarifs préférentiels aux conférences et journées d'études

Adhésion SEE		
Standard	Retraités, enseignants, jeunes actifs (< 35 ans)	Etudiants, en recherche d'emploi
<input type="checkbox"/> 125 € TTC	<input type="checkbox"/> 65 € TTC	<input type="checkbox"/> 15 € TTC
+ Abonnement REE (Version papier)		
<input type="checkbox"/> France & UE : 63 € TTC		<input type="checkbox"/> Hors UE : 71,70 € HT

TVA de la revue REE : 2,1%. Adhésion collective possible via des conventions de partenariat - Contactez-nous à : sg@see.asso.fr

MES COORDONNÉES

Prénom :

Nom :

ADRESSE DE LIVRAISON

Adresse :

Code postal :

Pays :

Ville :

Tél. :

e-mail* :

* Obligatoire

ADRESSE DE FACTURE (Si différente)

Je joins le bon de commande administratif N°
et je désire recevoir une facture au nom de mon employeur pour paiement
à réception

Raison sociale de l'employeur :

Service :

Activité (facultatif) :

Adresse :

Code postal :

Ville :

Pays :

N° TVA :

N° TVA intracommunautaire : obligatoire pour règlement HT en UE hors de France

e-mail* :

* Obligatoire

Date :

Signature (mentions obligatoires) et cachet si il y a lieu :

MON RÉGLEMENT

Je règle la somme de €par Chèque à l'ordre de la SEE Carte bancaire (Visa, Eurocard/Mastercard)N° Carte Date de validité N° cryptogramme (3 derniers chiffres au dos de la carte)

Conformément aux dispositions légales et réglementaires en matière de données personnelles, les informations recueillies sur ce formulaire sont enregistrées dans un fichier informatisé par la SEE (Société de l'électricité, de l'électronique et des technologies de l'information et de la communication) pour la mise en place et le suivi de l'abonnement souscrit ainsi que pour l'envoi de courriers, e-mails de réabonnements et informations concernant la SEE et ses activités. Elles sont conservées et sont destinées à être utilisées par la SEE et les prestataires techniques de la SEE afin de permettre la bonne réception du magazine et d'assurer le service client. Vous pouvez exercer votre droit d'accès aux données vous concernant par courrier : SEE - Service abonnements 17 rue de l'Amiral Hamelin 75783 Paris Cedex 16 ou par le formulaire de contact du site web : www.see.asso.fr

+ RAPIDE : www.see.asso.fr

La Revue REE est une publication de la SEE

Abonnez-vous à **La Revue 3E.I**

ENSEIGNER L'ÉLECTROTECHNIQUE ET L'ÉLECTRONIQUE INDUSTRIELLE



*La Revue 3E.I,
une publication pédagogique
de la SEE*

- Outil didactique pour les filières préparant à l'enseignement technique
- Trame indispensable à la formation continue des hommes de terrain
- 4 N° par an : Janvier, Avril, Juillet, Octobre



*La revue 3E.I :
3 dossiers par an, très complets,
sur des sujets d'actualité
+ 1 N° Pratique pédagogique*

Dossiers thématiques prévisionnels

- Le Génie Electrique dans les procédés
- Cybersécurité (partie 2)
- Stockage de l'Energie Electrique
- Numéro pédagogique / jeunes chercheurs

La Revue 3E.I est une publication trimestrielle de la SEE. Les sommaires des derniers numéros sont disponibles sur le site www.see.asso.fr/3ei



BULLETIN D'ABONNEMENT 2019

A retourner à la SEE - Service Abonnements, 17 rue de l'Amiral Hamelin 75783 Paris cedex 16 - France +33 1 56 90 37 17 - abo@see.asso.fr

ABONNEMENT 3E.I 2019 - PLEIN TARIF	INDIVIDUEL		INSTITUTIONNEL (BIBLIOTHÈQUE/LABORATOIRE)	
	France & UE	Hors UE	France & UE	Hors UE
FORMULE DUO (papier + numérique) Accès numérique 3E.I	42 € TTC	51,12 € HT	60 € TTC	68,74 € HT
	France & UE : 30 € TTC		Hors UE : 29,37 € HT	

FORMULE PREMIUM : Adhésion SEE + Tarif préférentiel à la revue 3E.I format papier + Accès numérique aux revues 3E.I et REE + Tarifs préférentiels conférences et journées d'études

	Standard	Retraités, enseignants, jeunes actifs (< 35 ans)	Etudiants, en recherche d'emploi
Adhésion SEE	125 € TTC	65 € TTC	15 € TTC
+ Abonnement 3E.I version papier	France & UE : 39 € TTC		Hors UE : 48,18 € HT

TVA de la revue 3E.I : 2,1 %. Adhésion collective possible via des conventions de partenariat - Contactez-nous à : sg@see.asso.fr

MES COORDONNÉES

Prénom :

Nom :

ADRESSE DE LIVRAISON

Adresse :

Code postal :

Pays :

Ville :

Tél. :

e-mail* :

* Obligatoire

MON RÉGLEMENT

Je règle la somme de _____ €

par Chèque à l'ordre de la SEE

Carte bancaire (Visa, Eurocard/Mastercard)

N° Carte _____

Date de validité _____ N° cryptogramme _____ (3 derniers chiffres au dos de la carte)

ADRESSE DE FACTURE (Si différente)

Je joins le bon de commande administratif N° : _____ et je désire recevoir une facture au nom de mon employeur pour paiement à réception

Raison sociale de l'employeur :

Service :

Activité (facultatif) :

Adresse :

Code postal :

Ville :

Pays :

N° TVA :

N° TVA intracommunautaire : obligatoire pour règlement HT en UE Hors de France

e-mail* :

* Obligatoire

Date

Signature (mentions obligatoires) et cachet si il y a lieu :

Conformément aux dispositions légales et réglementaires en matière de données personnelles, les informations recueillies sur ce formulaire sont enregistrées dans un fichier informatisé par la SEE (Société de l'électricité, de l'électronique et des technologies de l'information et de la communication) pour la mise en place et le suivi de l'abonnement souscrit ainsi que pour l'envoi de courriers, e-mails de réabonnements et informations concernant la SEE et ses activités. Elles sont conservées et sont destinées à être utilisées par la SEE et les prestataires techniques de la SEE afin de permettre la bonne réception du magazine et d'assurer le service client. Vous pouvez exercer votre droit d'accès aux données vous concernant par courrier : SEE - Service abonnements 17 rue de l'Amiral Hamelin 75783 Paris Cedex 16 ou par le formulaire de contact du site web : www.see.asso.fr



ABONNEMENT + RAPIDE : www.see.asso.fr

