

REE

REVUE DE
L'ÉLECTRICITÉ
ET DE
L'ÉLECTRONIQUE

EDITORIAL

2020, un bicentenaire et quelques nouveautés

Jean-Paul Porret

ENTRETIEN AVEC

André Merlin

la maîtrise des grands systèmes électriques

ÉNERGIE

TÉLÉCOMMUNICATIONS

SIGNAL

COMPOSANTS

AUTOMATIQUE

INFORMATIQUE

DOSSIER

La révolution des LED

➤ **DOSSIER**
LA TECHNOLOGIE DES COURANTS
PORTEURS EN LIGNE (CPL) P.69

➤ **ENTRETIEN AVEC...**
DOMINIQUE CARDON :
LA CULTURE NUMÉRIQUE P.131

➤ **RETOUR SUR...**
LA SAGA DE L'ÉCLAIRAGE
MARC LECONTE P.113

ENQUÊTE LECTEURS REE 2020



Enquête REE 2020

La revue

5. Comment avez-vous connu la REE ?

- Par la SEE (manifestations, colloques, etc.)
- Par le site de la SEE
- Par la newsletter SEE
- Par Twitter
- Par LinkedIn
- En bibliothèque
- Par un enseignant
- Par un collègue de travail
- Autre : _____

6. A quelle fréquence vous arrive-t-il de lire la REE ?

- Je suis abonné à la revue
- Je suis un lecteur régulier
- Je suis un lecteur occasionnel

7. Quelle version de la REE consultez-vous ?

- La version papier
- La version numérique
- Les deux versions

8. Une revue uniquement numérique répondrait-elle à votre attente ?

Afin de connaître ses lecteurs et de mieux répondre à leurs attentes, la SEE mène l'enquête sur le contenu de la REE.

- A quelle fréquence lisez-vous la REE ?
- Quelles sont vos rubriques préférées ?
 - Quels sont les domaines qui vous intéressent ?
- Que pourrions-nous améliorer dans la REE ?

Donnez votre avis en 5 minutes seulement.

Retrouvez l'enquête REE sur :



Ou sur **see.asso.fr**



2020, un bicentenaire et quelques nouveautés

SEE, REE, IEEE, GSI, JICABLE, ERTS.... Jamais, en si peu de temps, je n'ai été confronté à autant de sigles et d'acronymes !

Une prise de poste, c'est la découverte d'un nouveau monde. Je dois reconnaître que cette découverte était d'autant plus grande que je ne viens pas d'un milieu scientifique. Je tiens ici à remercier le président François Gerin pour la confiance qu'il m'accorde et surtout mon prédécesseur Jacques Horvilleur pour la transition en douceur qu'il a assurée.

C'est donc avec un plaisir non feint que j'ai appris à connaître la SEE et son environnement. Un écosystème rempli de connaissances, de recherches et de prospectives. C'est avec la même joie que je me suis rendu compte que la société savante qui m'a accueilli fourmille de talents et d'opportunités de développement. Sept congrès organisés en 2019, 1 800 participants de 70 nationalités différentes... Et une année 2020 qui s'annonce tout aussi palpitante sous le signe du bicentenaire des découvertes d'André-Marie Ampère.

Une ambition renouvelée

Une prise de poste s'accompagne aussi de changements. La feuille de route que m'a donnée le président, en accord avec le conseil d'administration, suppose des politiques audacieuses afin que la SEE recouvre son lustre d'antan.

Pour rénover notre identité visuelle, elle-même portée par un site Web rajeuni, différentes actions seront progressivement engagées tout au long de l'année 2020.

Certaines seront novatrices d'autres plus traditionnelles. Mais ce qui est sûr, c'est que toutes seront menées avec détermination. Ainsi, les jeunes, les startupers, les actifs, les académiques et les industriels, hommes ou femmes, trouveront de quoi satisfaire leur soif de connaissance en fréquentant la SEE.

Pour y parvenir, les actions doivent être développées au niveau régional. Non seulement la SEE va renforcer son réseau dans les territoires, mais elle doit aussi multiplier les événements « décentralisés », seule ou en partenariat, afin de rencontrer ses membres (actuels ou futurs) partout en France. L'international ne sera pas oublié, avec la multiplication des publications en anglais. Enfin, nos partenaires seront dignement mis à l'honneur. La SEE

relatera leur actualité tout en s'appuyant sur leurs talents et leurs compétences.

Un pour tous, tous pour la SEE

Régie par la célèbre loi de 1901, toute société savante qu'elle est, la SEE n'en demeure pas moins une association. Et qui dit association, dit affectio societatis, non pas au sens du code civil, mais au sens premier du terme : la volonté de s'unir.

Sans l'engagement du plus grand nombre, les meilleurs projets sortis des cerveaux les plus brillants resteront lettres mortes. La SEE a plus que jamais besoin de l'engagement de tous. Quel que soit le rôle que membres et abonnés souhaitent prendre, la SEE accueillera toutes les bonnes volontés.

REE, le meilleur outil pour y parvenir ?

Nouvel arrivant rencontrant les partenaires de la SEE, je suis frappé par le fait qu'il n'y a pas une rencontre, pas un rendez-vous sans qu'on ne me vante les qualités de la REE. Que tous ceux qui œuvrent à cette réussite soient remerciés et félicités pour le travail qu'ils accomplissent numéro après numéro.

Mais qualité et reconnaissance n'interdisent pas d'envisager des évolutions ; au contraire, elles nous y obligent.

Ainsi afin de mieux vous connaître et de mieux répondre à vos attentes, la REE lance un questionnaire sur ses lecteurs et leurs habitudes. Nous comptons sur

vos commentaires ! Forte de vos réponses et de nos aspirations, la REE va poursuivre l'exploration des grands thèmes que sont les courants forts, les courants faibles, les radars, l'énergie sous toutes ses formes, les nouveaux moyens de communication... Mais nous irons encore plus loin dans les nouveaux domaines techniques. La REE sera heureuse d'ouvrir ses pages à de nouveaux auteurs, qu'ils soient jeunes chercheurs ou seniors, dans un grand groupe ou dans une PME, partenaire ou non, de la SEE. Vous le voyez, l'année 2020 s'annonce pleine de challenges et de nouveautés. Au plaisir de les vivre avec vous ! ■

Jean-Paul Porret
Secrétaire Général de la SEE



“Ainsi, les jeunes, les startupers, les actifs, les académiques et les industriels, hommes ou femmes, trouveront de quoi satisfaire leur soif de connaissance en fréquentant la SEE.”

À LA UNE
p.37



Sommaire

Numéro 1 - 2020

1 EDITORIAL

2020, un bicentenaire et quelques nouveautés
Jean-Paul Porret

4 GRAND PRIX 2019 DE LA SEE

Prix André Blanc-Lapierre : une approche biclustering pour les systèmes de recommandation
Florestan de Moor

9 FLASH INFOS

- 9 U-carbone: une nouvelle forme allotropique du carbone aux propriétés remarquables – AB
- 10 A Göteborg, comme ailleurs, les bus passent à l'électrique – JPH
- 11 Dans l'energy harvesting, l'imagination est toujours au pouvoir – JPH
- 12 Energies renouvelables : la France reste devant l'Allemagne mais le compte n'y est pas – JPH

14 ACTUALITÉS

- 14 Le prix Nobel de chimie 2019 récompense les inventeurs des batteries Li-ion
Alain Brenac & Jean-Pierre Hauet
- 19 Le Pacte vert pour l'Europe
Gérald Sanchis
- 23 Les défis de la construction d'un nouveau porte-avions
Marc Leconte
- 27 Regain d'intérêt pour les mini-centrales nucléaires (SMR)
Gérald Sanchis
- 31 Les batteries Li-ion à anodes semi-liquides
Jean-Pierre Hauet

34 VIENT DE PARAÎTRE

La REE vous recommande

37 L'ÉCLAIRAGE

- 37 Introduction : La technologie LED : une révolution dans le domaine de l'éclairage, mais pas seulement...
Georges Zissis
- 40 Chemins croisés entre éclairage et radiotélécommunications
Laurent Canale
- 47 Les diodes électroluminescentes pour l'éclairage
Patrick Mottier
- 55 Lumière artificielle et santé humaine : une relation complexe
Sébastien Point
- 62 Eclairage horticole : pourquoi choisir la technologie LED ?
Urbain Niangoran

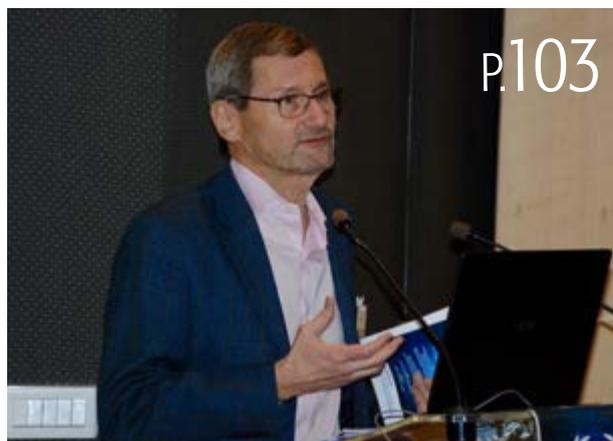
69 LA TECHNOLOGIE DES COURANTS PORTEURS EN LIGNE (CPL)

- 69 Introduction : Les courants porteurs en ligne
Patrice Collet
- 71 Les communications sur les réseaux électriques
Pascal Pagani
- 81 HD-PLC broadband power line communications for IoT
Hisao Koga, Jean-Philippe Faure
- 90 Les courants porteurs en ligne (CPL) au profit des réseaux électriques intelligents
Cédric Lavenu, Cédric Chauvenet



103 LIBRES PROPOS

Open source : qui paye pour les logiciels libres ?
Bruno Meyer



107 GROS PLAN SUR...

Mesure de l'apparence
Gaël Obein

113 RETOUR SUR...

La saga de l'éclairage - Les techniques d'éclairage, des origines à la lampe à incandescence
Marc Leconte

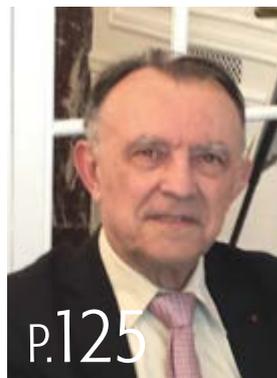


124 CHRONIQUE

Quand nous sommes séduits par des vendeurs de pacotille
Dominique Maillard

125 ENTRETIEN AVEC

André Merlin : la maîtrise des grands systèmes électriques



131 ENSEIGNEMENT ET RECHERCHE

- 131 Entretien avec **Dominique Cardon** : la culture numérique
- 135 Echos de l'enseignement supérieur
Bernard Ayrault & Alain Brenac



138 SEE EN DIRECT

La vie de l'association

La SEE contribue à la reconnaissance du niveau scientifique et technique de ses membres et en tout premier lieu des plus jeunes, étudiants des universités et grandes écoles. Les prix «Jeunes» André Blanc-Lapierre ont ainsi été institués en mémoire de ce grand scientifique français.

Une approche biclustering pour les systèmes de recommandation

Les systèmes de recommandation se sont aujourd'hui immiscés partout dans notre quotidien, que ce soit dans les commerces en ligne, les réseaux sociaux ou encore les plates-formes de streaming vidéo et musical. Améliorer l'efficacité des algorithmes sous-jacents est un enjeu au cœur des thématiques de recherche dans ce domaine.



À propos

Florestan De Moor est un jeune diplômé de l'École normale supérieure de Rennes et de l'université de Rennes 1. En conclusion de son master recherche en informatique, il effectue un stage à INRIA où il s'intéresse aux systèmes de recommandation et évalue expérimentalement les forces et faiblesse d'une nouvelle approche dans ce domaine.

Introduction

Que l'on cherche un nouveau morceau de musique à écouter sur Spotify ou une nouvelle vidéo à regarder sur YouTube, les catalogues toujours plus immenses de ces services constituent un enjeu de taille : face à tant de possibilités, il est raisonnable de penser que s'y cachent de nombreux produits susceptibles de nous intéresser, lesquels deviennent pourtant de plus en plus difficiles à trouver par nous-mêmes comme illustré sur la **figure 1**.

C'est la raison même de l'émergence des premiers systèmes de recommandation dans les années 90 : filtrer une gigantesque masse de données pour seulement montrer à chaque utilisateur ce qui va potentielle-

ment lui plaire, c'est-à-dire lui proposer un catalogue personnalisé (**figure 2**).

Rapidement, ces systèmes de filtrage automatique sont devenus cruciaux pour de nombreux commerces et services en ligne tels que Amazon, Netflix, YouTube ou encore Twitter.

Aujourd'hui encore, de nombreux articles de recherche visent à mettre au point de nouveaux procédés pour perfectionner les algorithmes de recommandation voire l'entièreté de la chaîne systémique qui en assure le bon fonctionnement. Les objectifs sont variés : améliorer la pertinence des résultats, réduire le coût computationnel, faciliter le déploiement à grande échelle sur des grappes de serveurs, ou bien répondre aux nouvelles préoccupations en terme de sécurité, de



Figure 1 : Il est parfois difficile de trouver son compte par des requêtes de recherche tant les possibilités sont nombreuses



Figure 2 : Les listes d'items recommandés sont devenues une nouvelle façon de consommer en complément des requêtes de recherche.

vie privée, de bulles de filtre ou encore de sérendipité. Parce que ces systèmes sont désormais immiscés dans la plupart des services et applications que nous utilisons au quotidien et ont introduit une nouvelle façon de consommer qui a trouvé sa place en complémentarité des moteurs de recherche, ces enjeux de recherche sont plus que jamais cruciaux.

Dans ce travail, nous nous intéressons à une approche exploitant une technique de classification connue sous le nom de *biclustering*, et qui a été peu utilisée jusqu'à présent dans le domaine de la recommandation. C'est pourquoi nous cherchons à établir ses forces et ses faiblesses par rapport à l'état de l'art du domaine à travers une étude expérimentale, laquelle nous permet ensuite de dégager des pistes d'améliorations destinées à cette famille d'algorithmes.

Méthodes de recommandation

Principales techniques

L'objectif d'un système de recommandation est, pour un utilisateur donné, de générer une liste d'items inconnus de cet utilisateur et susceptibles de l'intéresser. À cette fin, on distingue généralement trois grandes catégories d'algorithmes.

Basé sur le contenu

Pour un utilisateur donné, les recommandations sont générées en fonction de son historique de consommation et des caractéristiques des items qu'il contient (comme la description d'un produit ou les mots-clés d'une vidéo). Par exemple, quelqu'un qui regarde régulièrement des films d'actions se verrait proposer un film d'action qu'il n'a pas encore vu. Cette approche est une des plus simples à mettre en place et permet de facilement expliquer pourquoi un item donné

est recommandé. En pratique, elle donne toutefois des résultats moins pertinents que les catégories qui suivent.

Filtrage collaboratif

Cette approche met à profit la masse d'informations possédées sur tous les utilisateurs du système afin de construire un modèle de prédiction ou d'identifier des profils similaires au nôtre. L'avantage est de totalement s'abstraire du contenu même des items et d'utiliser uniquement les interactions qu'ont les utilisateurs avec le système. Les résultats sont en pratique de bonne qualité ce qui fait du filtrage collaboratif une des méthodes privilégiées dans la plupart des systèmes commerciaux et académiques, bien qu'elle présente également quelques défauts : craintes en terme de sécurité et de vie privée (puisque les données de tous sont utilisées pour générer les recommandations de chacun), ou encore difficultés à proposer des items à de tout nouveaux utilisateurs.

Une approche basée sur le contenu peut par exemple produire des recommandations pour les nouveaux utilisateurs et combler la déficience du filtrage collaboratif sur cet aspect.

Filtrage collaboratif

La technique du filtrage collaboratif est, comme mentionnée précédemment, une des plus couramment utilisée pour les nombreux avantages qu'elle offre, que ce soit son efficacité ou son affranchissement du contenu même des items. Le système construit un profil interne pour chaque utilisateur. Le tout peut être représenté par une matrice (dite utilisateur-item) comme illustrée en **figure 3** où chaque utilisateur incarne une ligne et chaque item une colonne ; chaque case contient alors un score qui représente l'appréciation de cet item par cet utilisateur. Ce score peut être calculé de diverses manières en utilisant les interactions des utilisateurs avec le service, que ce soit de manière implicite (les historiques de navigation, les clics, etc.) ou explicite (les avis et notes postés sur un site marchand, les pouces bleus ou rouges sur YouTube, etc.). L'information n'est cependant que partielle : la matrice est creuse, c'est-à-dire que de nombreuses cases sont vides, ce qui traduit le fait que l'appréciation d'un item par un utilisateur donné n'est pas connue. Une méthode courante pour produire des recommandations

	■	■	■	■	■	■	■	■	■
■		3	2		1		4		4
■	1		2		2		4		4
■	2		1				2	1	4
■		1	3	3	3				5
								5	4

Figure 3 : Exemple de matrice utilisateur-item avec des scores sur une échelle de 1 à 5 étoiles.

Systèmes hybrides

Plusieurs techniques sont combinées et utilisées simultanément pour cumuler les points forts et remédier aux faiblesses individuelles.

consiste à prédire les valeurs manquantes de cette matrice et simplement proposer à chaque utilisateur les produits qu'il ne connaît pas et qui obtiennent de hautes va- ●●●

••• leurs de prédiction (ceux considérés comme les plus susceptibles de lui plaire).

Deux principaux sous-groupes de techniques peuvent être différenciés dans le filtrage collaboratif, à travers l'utilisation d'un modèle ou bien d'une notion de voisinage.

Basé sur un modèle

Un modèle est construit pour calculer des prédictions, par exemple basé sur des notions probabilistes, ou encore en écrivant la matrice utilisateur-item comme un produit de deux matrices qui fait ainsi apparaître des facteurs latents, comme illustré en **figure 4**. Ce dernier procédé, appelé factorisation de

approches basées sur le biclustering. Le biclustering est une technique de classification couramment utilisée en génomique qui vise à extraire un ensemble de sous-matrices significatives. Par exemple, il peut s'agir dans notre cas de trouver des utilisateurs qui ont noté positivement les mêmes films. Nous identifions quelques travaux qui utilisent cette approche et s'appuient sur les sous-matrices obtenues pour générer des recommandations. Nous commençons par étudier les définitions adoptées par chaque article en terme de sous-matrice significative et constatons des

à plusieurs sous-matrices comme n'en appartenir à aucune (**figure 6**).

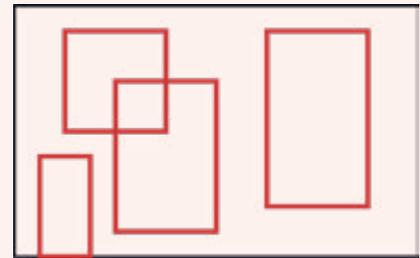


Figure 6 : Biclustering général

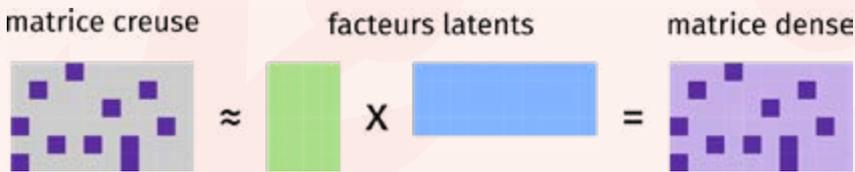


Figure 4 : Principe de la factorisation de matrice pour obtenir une matrice dense à partir d'une matrice creuse, le but étant de minimiser l'erreur qui est faite sur les valeurs connues de la matrice creuse.

matrice et proposé par Koren et al. [1] durant le prix Netflix¹, est l'une des techniques piliers du domaine.

Basé sur un voisinage

Le principe est d'identifier un ensemble d'utilisateurs qui ressemblent le plus à un individu donné selon une certaine métrique de similarité, par exemple en comptant le nombre d'items appréciés en commun dans les profils internes. L'intuition est qu'un item qui a plu à un voisin a de grandes chances de plaire aussi à cet individu. Une variante de cette technique consiste à considérer des voisinages d'items plutôt que d'utilisateurs.

Une approche basée sur le biclustering

Dans ce travail [2], nous cherchons à générer des recommandations en utilisant des

choix différents qui rendent à première vue difficile la comparaison de ces différentes méthodes. Nous pouvons toutefois regrouper les différents choix en deux grandes catégories en termes de structure.

Biclustering Partitionnel

Les lignes et colonnes de la matrice sont partitionnées, créant comme un quadril-

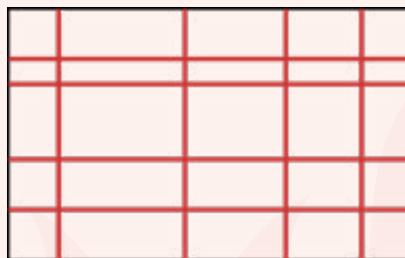


Figure 5 : Biclustering partitionnel.

lage (**figure 5**). Chaque case appartient ainsi à une unique sous-matrice.

Biclustering général

Dans ce cas, aucune structure particulière n'est imposée : une case peut appartenir

Dans les deux cas, des contraintes supplémentaires peuvent être imposées (sur le contenu, la taille des sous-matrices, etc.) le plus souvent sous la forme d'un problème d'optimisation. Un exemple est la recherche de sous-matrices constantes et maximales pour la relation d'ordre d'inclusion : dans une sous-matrice donnée, une unique valeur doit être présente et tout ajout d'une ligne ou colonne supplémentaire ne doit pas violer cette première propriété, c'est-à-dire qu'elle est la plus grande possible.

Évaluation expérimentale

Nous procédons à une évaluation expérimentale pour comparer les différents systèmes de recommandation basés sur du biclustering entre eux mais aussi avec les techniques standard de l'état de l'art du domaine. Nous utilisons pour cela plusieurs jeux de données publics dont MovieLens², l'un des plus utilisés en recherche dans ce domaine et qui recense des millions de notes données à des films par des utilisateurs anonymisés à travers un identifiant numérique.

Afin de réaliser des simulations expérimentales, le profil de chaque utilisateur dans le jeu de données est divisé en deux parties. La première contribue à l'ensemble d'apprentissage qui va permettre d'entraîner l'algorithme. On génère ensuite des prédictions par rapport aux données présentes dans la

¹ Compétition lancée par Netflix en 2006 qui consistait à élaborer un algorithme de filtrage collaboratif générant des prédictions plus précises que celles produites par l'algorithme de l'entreprise d'au moins 10 %. Un prix d'un million de dollars a été versé à l'équipe gagnante en 2009. (<https://www.netflixprize.com>)

² MovieLens est un système de recommandation en ligne spécialisé dans les films et maintenu par le laboratoire de recherche GroupLens de l'université du Minnesota. (<https://grouplens.org/datasets/movielens>)

“Les systèmes de recommandation sont aujourd’hui présents dans de nombreux commerces et services en ligne de notre quotidien.”

seconde partie, l’ensemble de test, ce qui permet de vérifier la pertinence des prédictions.

Pour comparer les différents algorithmes entre eux, nous considérons plusieurs métriques d’évaluation : la qualité des recommandations (est-ce que les items suggérés sont effectivement ceux que l’utilisateur a aimé dans l’ensemble de test ?), le temps de calcul (combien de temps faut-il pour entraîner l’algorithme et générer des listes de recommandation pour tous les utilisateurs ?), la portée (y a-t-il des utilisateurs pour lesquels l’algorithme échoue à produire des recommandations ?) et la couverture (y a-t-il des items dans le catalogue qui ne sont jamais recommandés ?).

Résultats

Nos multiples expérimentations nous permettent de formuler les conclusions suivantes.

Biclustering partitionnel

Cette approche, utilisée par George et Merugu [3], rivalise pleinement avec la factorisation de matrice en termes de qualité et de performance. Par ailleurs, elle pourrait potentiellement se révéler encore plus intéressante dans un scénario incrémental, c’est-à-dire dans lequel les données sont intégrées dans le système au fur et à mesure qu’elles sont générées, ce qui est le cas par exemple des services de micro-blogging ou encore des systèmes de recommandation dédiés aux articles d’actualité, ces deux types d’application étant soumis à de fortes dynamiques en temps réel.

Biclustering général

Dans un cadre plus général, dans les travaux de Symeonidis, et al. [4], de Castro et al. [5] et de Singh et Mehrotra [6], nous constatons un impact sur les performances, le coût computationnel étant plus élevé. De plus, un pourcentage non négligeable d’utilisateurs

peut ne pas recevoir de recommandations. En revanche, d’autres utilisateurs font face à des items suggérés qui se révèlent plus pertinents qu’avec les autres techniques, factorisation de matrice incluse. Cette approche pourrait donc être particulièrement intéressante à utiliser dans un système hybride en complément d’autres algorithmes.

Pistes d’améliorations

Nous nous concentrons sur le biclustering partitionnel et commençons à investiguer plusieurs idées pour construire sur les travaux existants de George et Merugu [3]. Nous proposons tout d’abord un protocole afin d’établir automatiquement les nombres de partitions à utiliser pour les lignes et les colonnes de la matrice utilisateur-item. Nos premiers tests montrent que notre méthodologie permet de s’approcher des valeurs idéales de ces paramètres au prix d’un surplus de calcul ; le système devient alors plus facile à mettre en place et évite à l’opérateur une phase de tâtonnement.

Nous constatons également un sur-apprentissage pour un nombre élevé de partitions sur les lignes et sur les colonnes, c’est-à-dire que l’erreur sur les données d’entraînement diminue mais la pertinence des résultats

empire avec les données de test. Pour pallier ce problème, nous essayons de modifier la fonction objectif utilisée lors de l’apprentissage pour ajouter un terme de régularisation comme cela est classiquement fait dans le domaine de l’apprentissage statistique. Lors de nos premières expérimentations avec un terme de régularisation très simple, nous obtenons une petite hausse de la qualité de recommandation. Cela nous laisse à penser que des améliorations significatives pourraient être atteintes avec plus d’investigations dans cette direction.

Conclusion

Les systèmes de recommandation sont aujourd’hui présents dans de nombreux commerces et services en ligne de notre quotidien, ce qui motive de multiples travaux de recherche à répondre aux problématiques émergentes et perfectionner les solutions répondant à celles plus anciennes. Dans ce travail, nous nous sommes intéressés à une approche basée sur du biclustering, une technique de classification, peu utilisée jusqu’à alors, et l’avons comparée expérimentalement à l’état de l’art du domaine pour en comprendre les forces et les faiblesses. Nos conclusions soulignent que cette approche est prometteuse pour certains scénarios en temps réel ou au sein de systèmes hybrides, en faisant ainsi une direction de recherche intéressante pour le futur. ■

Florestan De Moor,

Prix Jeunes André Blanc-Lapierre

Références

- [1] Koren, Yehuda and Bell, Robert M. and Volinsky, Chris, Matrix Factorization Techniques for Recommender Systems, IEEE Computer, 2009
- [2] De Moor, Florestan, A Biclustering Approach to Recommender Systems, 2019
- [3] George, Thomas and Merugu, Srujana, A Scalable Collaborative Filtering Framework Based on Co-Clustering, Proceedings of the 5th IEEE International Conference on Data Mining (ICDM 2005), 27-30 November 2005, Houston, Texas, USA, 2005
- [4] Symeonidis, Panagiotis and Nanopoulos, Alexandros and Papadopoulos, Apostolos N. and Manolopoulos, Yannis, Nearest-biclusters collaborative filtering based on constant and coherent values, Information Retrieval, 2008
- [5] Castro, Pablo A. D. de and França, Fabrício Olivetti de and Ferreira, Hamilton M. and Zuben, Fernando J. Von, Applying Biclustering to Perform Collaborative Filtering, Seventh International Conference on Intelligent Systems Design and Applications, ISDA 2007, Rio de Janeiro, Brazil, October 20-24, 2007, 2007
- [6] Singh, Monika and Mehrotra, Monica, Impact of biclustering on the performance of Biclustering based Collaborative Filtering, Expert Systems Applications, 20

Abonnez-vous à

La Revue 3E.I



ENSEIGNER L'ÉLECTROTECHNIQUE ET L'ÉLECTRONIQUE INDUSTRIELLE

- Outil didactique pour les filières préparant à l'enseignement technique
- Trame indispensable à la formation continue des hommes et des femmes de terrain
- 4 N° par an : Janvier, Avril, Juillet, Octobre
- 3 dossiers complets par an sur des sujets d'actualité + 1 N° Pratique pédagogique

BULLETIN D'ABONNEMENT 2020



VERSION PAPIER

4 numéros : janvier, avril, juillet, octobre.
Distribution postale

France & UE	Hors UE
<input type="checkbox"/> 40 € TTC	<input type="checkbox"/> 49,18 € 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"/> 30 € TTC	<input type="checkbox"/> 29,38 € HT



VERSION DUO

Version imprimée
+ version numérique

France & UE	Hors UE
<input type="checkbox"/> 50 € TTC	<input type="checkbox"/> 58,97 € HT

VERSION PREMIUM

- > Adhésion SEE avec accès e3Ei
- + Tarif préférentiel à la revue 3E.I 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 3E.I (Version papier)		
<input type="checkbox"/> France & UE : 32 € TTC		<input type="checkbox"/> Hors UE : 41,34 € 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)

Je consens à recevoir les autres diffusions de la SEE & de ses activités (congrès, soirées débats, revues, etc.) qui sont extérieurs aux diffusions liés à mon abonnement.

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. 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
Offre valable du 01/01/2020 au 31/12/2020.

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 :



ABONNEMENT + RAPIDE : <https://www.see.asso.fr/3ei>

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



U-carbone : une nouvelle forme allotropique du carbone aux propriétés remarquables

Une équipe américaine annonce avoir mis en évidence une nouvelle forme du carbone, voisine du graphène, sous forme de couches minces fortement réfléchissantes et présentant des propriétés ferromagnétiques. Si cette découverte est confirmée, elle peut ouvrir des perspectives intéressantes dans des applications variées (miroirs, cellules photovoltaïques, biocapteurs...).

Lors d'un symposium sur les nanomatériaux en novembre 2019, le physicien Joël Therrien de l'Université du Massachusetts à Lowell a donné une communication ¹ qui a retenu l'attention de l'auditoire en affirmant avoir découvert « par hasard » une nouvelle forme allotropique du carbone présentant des propriétés remarquables. En effet, comme le diamant et le graphène, deux autres formes du carbone, le matériau fabriqué en couches minces se révèle être plus dur que l'acier inoxydable et à peu près aussi conducteur et aussi réfléchissant qu'un miroir en aluminium poli. Plus surprenant encore est son caractère ferromagnétique, stable jusqu'à des températures pouvant aller à 125 °C, caractéristique rare dans les autres allotropes du carbone pur.

Cette découverte est le résultat d'une tentative ratée de synthèse du pentagraphène, une feuille d'atomes de carbone liés en anneaux pentagonaux qui a été prédite mais jamais créée. L'idée de l'auteur était d'exploiter la technique dite de frustration géométrique ², particulièrement adaptée aux structures pentagonales. En plaçant une feuille de cuivre comme catalyseur au centre d'un four de dépôt chimique en phase vapeur (CVD) à environ 800 °C, Therrien a obtenu, contrairement à son attente, le dépôt d'une nouvelle variété de carbone, baptisée provisoirement U-carbone, à partir du craquage du 2,2 diméthyl butane (DMB). Après deux ans d'expérimentation avec d'autres hexanes ramifiés que le DMB, l'équipe a pu reproduire de façon fiable des films de cette substance pouvant aller jusqu'à 1 µm d'épaisseur et plusieurs centimètres de diamètre.

¹ Int. Symposium on clusters and nanomaterials "A novel carbon allotrope grown via molecularly templated CVD" Joel Therrien, University of Massachusetts, Lowell, USA

² La frustration géométrique peut se définir comme l'impossibilité d'étendre l'ordre local d'un système, ici d'un réseau cristallin, pour paver l'espace.

Ces couches minces étudiées par microscopie électronique et aux rayons X ne présentent pas d'impuretés décelables qui auraient pu expliquer certaines des propriétés observées. En ce qui concerne la structure qui n'est pas complètement élucidée, l'équipe a des raisons de penser que les atomes de carbone forment des couches ondulées recouvertes d'anneaux de six ou douze atomes et reliées entre elles par des liaisons covalentes, contrairement au graphite constitué de couches de carbone plates qui glissent librement les unes sur les autres. Une caractérisation plus approfondie est encore nécessaire pour conclure sur ce point.

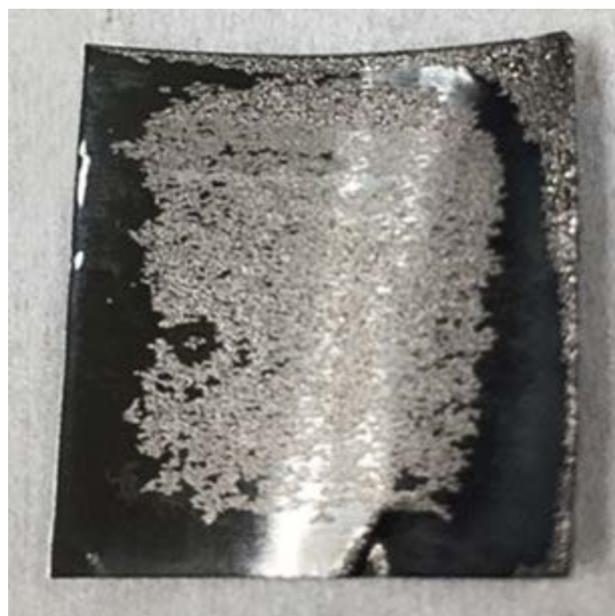


Figure 1 : Couche brillante d'U-carbone de 50 nm d'épaisseur obtenue par dépôt chimique en phase vapeur. Son coefficient de réflexion dépasse 90 % dans une large gamme de longueurs d'onde (de l'ultra-violet lointain à l'infrarouge moyen). Cette caractéristique permettrait d'en faire un revêtement réfléchissant utile, plus durable que l'aluminium standard, pour les miroirs des appareils photo et des télescopes.

La conductivité électrique de ce matériau est un peu inférieure à celle de l'acier inoxydable. Mais d'autres propriétés électroniques sont intéressantes ; ainsi, par recuit progressif jusqu'à 1 000 °C, la brillance du matériau s'atténue et celui-ci se transforme en un semi-conducteur à bande interdite semblable à celle du silicium amorphe. D'après l'auteur, cette propriété pourrait en faire un matériau candidat pour les cellules photovoltaïques.

La dureté et la résistance mécanique de cette nouvelle forme de carbone semblent extrêmement élevées. Même si ces caractéristiques n'ont pas encore été mesurées précisément, leurs valeurs pourraient s'apparenter à celle du graphène.

- Quant aux propriétés magnétiques que présente ce matériau jusqu'à des températures élevées, elles pourraient s'expliquer par la nature des liaisons électroniques dans le matériau, de type sp² ou sp³, les premières facilitant l'alignement des spins des électrons non impliqués dans la liaison, condition nécessaire pour obtenir du ferromagnétisme.

L'exposé de Joël Therrien a suscité à la fois enthousiasme et prudence dans l'assistance des chercheurs présents à la réunion. Beaucoup attendent une publication plus documentée qui ne manquera pas de sanctionner ces travaux. Le carbone étant bien plus léger que les éléments ferromagnétiques habituels (Fe, Ni ou Mn) et non nocif pour l'organisme, des applications de type biocapteurs ou micro-transporteurs de médicaments *in vivo* pourraient être envisagées. Mais il faudra en priorité s'assurer que cette propriété est bien intrinsèque à cette nouvelle variété et ne découle pas d'une contamination involontaire survenue pendant le dépôt.

Joël Therrien se dit optimiste quant au potentiel à long terme de la frustration géométrique pour synthétiser de nouvelles formes allotropes du carbone, voire d'autres éléments : « *Même si cela ne fonctionnait que pour le carbone, le fait même qu'il y ait probablement des centaines d'allotropes différents susceptibles d'être créés en utilisant cette approche, ouvre considérablement le champ des nanomatériaux fonctionnels et de leurs applications potentielles* ». Après le graphène, matériau déjà exceptionnel, l'élément carbone à qui l'on doit déjà toute la chimie organique, n'a peut-être pas encore dit son dernier mot. ■ AB

➤ A Göteborg comme ailleurs, les bus passent à l'électrique

Le groupe international helvético-suédois ABB a annoncé en janvier qu'il allait assurer la recharge électrique de 157 nouveaux bus électriques qui sillonneront les villes de Göteborg, Mölndal et Partille en Suède. Dans la ligne de la vision du gouvernement suédois selon laquelle la Suède devrait être un pays climatiquement neutre d'ici 2025, l'entreprise de transport public Västtrafik table sur une électrification de l'ensemble du trafic urbain dans le comté de Västra Götaland d'ici 2030.

La Suède n'a pas le monopole des solutions électriques et de nombreuses villes françaises, Paris, Marseille, Nantes, Orléans... ont entrepris la migration de leur flotte traditionnelle vers des véhicules à très basse émission, électriques pour l'essentiel.

La problématique des autobus électriques

La cas de Göteborg est cependant l'occasion d'aborder la question des modalités d'électrification des lignes d'autobus ur-

bains qui peut prendre des formes différentes, avec des véhicules qui embarquent plus ou moins de batteries et avec des modalités de recharge qui dépendent du problème à traiter. Dans certains cas, il sera possible de se limiter à des recharges au dépôt pendant la nuit, si l'autonomie des bus pendant la journée est suffisante. C'est la stratégie visée par la RATP pour certaines de ces lignes. Elle a l'avantage d'éviter la construction d'infrastructures en ligne et elle permet le déploiement au dépôt de stratégies d'échelonnement de la recharge des différents bus, de façon que tous les bus soient chargés au matin mais en faisant appel à une puissance totale minimale et en minimisant ainsi les frais de raccordement au réseau.

Dans d'autres cas, il pourra être nécessaire ou possible de recharger en bout de ligne, pendant des arrêts de 10 à 15 minutes, ou en faisant appel, si le parc le permet, à un véhicule de back-up, le temps que le véhicule principal se recharge.

Mais dans le cas des bus à haute qualité de service, c'est un service continu qu'il faut assurer, sans interruption significative. En outre, la recherche d'une minimisation des investissements conduit naturellement à limiter le nombre de bus et donc à les faire tourner au maximum. On se tourne alors vers des systèmes de biberonnage en ligne, généralement lors des arrêts.



Photo 1 : Système de recharge par biberonnage – © ABB.

Le biberonnage en ligne

Cette recharge lors des arrêts doit bien évidemment être très rapide. Techniquement, cela implique l'établissement de la connexion à l'infrastructure en moins d'une seconde, de recharger pendant une quinzaine de secondes à une puissance de plusieurs centaines de kW, quitte à s'arrêter plus longtemps au terminus ou lors de certains arrêts.

L'un des avantages de cette solution est qu'elle permet d'alléger le véhicule en emportant moins de batteries et donc de transpor-

ter plus de passagers. Typiquement, les batteries vont fonctionner entre 40 et 60 % de leur capacité. Mais l'optimisation du système nécessite de prendre en compte d'assez nombreux paramètres : la longueur de la ligne, le nombre et l'espacement des arrêts, le profil de la ligne, la longueur de la rame de bus, l'autonomie à assurer en cas de défaillance d'un point de recharge, la qualité de service attendue, etc.

Le cas de Göteborg

En règle générale, sur le plan technique, la recharge se fait par pantographe qui peut-être montant depuis le bus ou descendant depuis l'installation. Dans le cas de Göteborg, Mölndal et Partille, les bus seront chargés par des chargeurs Panto Down haute puissance (450 kW) d'ABB. Cette solution modulaire est basée sur OppCharge, une interface ouverte pour la charge pour bus électriques à courant continu (CC). Elle offre une charge haute puissance grâce à un système de connexion automatique situé sur le toit du véhicule. En complément de l'installation (stations de charge et l'ensemble du matériel nécessaire à la connexion au réseau), un service numérique propose une connectivité orientée Web permettant aux opérateurs du réseau de procéder à distance à la surveillance et à la configuration des points de charge mais aussi de réduire les temps d'immobilisation et d'accroître l'efficacité.

Le bilan CO₂ de l'installation permet de conclure que le système permet une réduction des émissions de CO₂ de 88 % par rapport à un système de bus classique. ■ JPH

➤ Dans l'energy harvesting, l'imagination est toujours au pouvoir

Les idées ne manquent pas pour capter l'énergie ambiante afin d'assurer l'alimentation en électricité des capteurs de l'IoT. Même le rayonnement nocturne et les flocons de neige pourraient être mis à contribution.

L'alimentation électrique des objets connectés de l'IoT (Internet des objets) ou de l'IIoT (Internet industriel des objets) est un problème important. Rien ne sert en effet de développer des radiocommunications performantes par Wi-Fi, Bluetooth, ZigBee ou la 4G et bientôt la 5G, si, aux côtés des communications sans fil, une alimentation filaire reste nécessaire pour permettre à ces objets de fonctionner et de transmettre leurs données. Les piles et batteries peuvent être une solution mais pas toujours : les capteurs sont parfois difficilement accessibles et piles et batteries sont sujettes à des défaillances. La captation de l'énergie ambiante par *energy harvesting* (récolte d'énergie) ou *energy scavenging* (piégeage de l'énergie) est un domaine technique où la diversité des phénomènes phy-

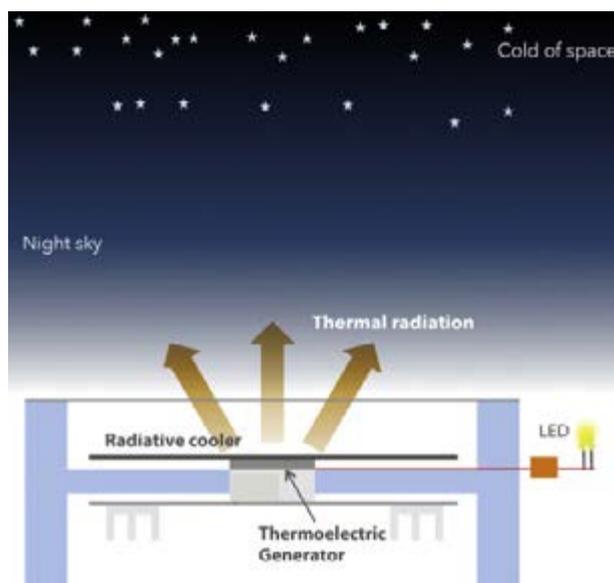
siques utilisables jointe à l'imagination des ingénieurs conduit à un ensemble de solutions qui semblent aujourd'hui sans limite. Un article invité de la REE 2015-1 lui était consacré³. Les phénomènes physiques mobilisables sont très divers :

- effet photo-électrique
- effet thermoélectrique
- effet triboélectrique
- effet piézoélectrique
- effet inductif
- captation des ondes électromagnétiques
- captation des vibrations,
- etc.

Dans tous les cas, la densité d'énergie est faible voire extrêmement faible. Mais il s'agit simplement de collecter et de stocker l'énergie captée dans un condensateur ou une mini-batterie, pour le moment venu, actionner de temps en temps l'organe de mesure et le système radio de transmission des données.

La miniaturisation de l'électronique et l'utilisation de protocoles radio très frugaux en énergie (Sigfox ou EnOcean) facilitent le recours à de telles solutions.

Deux publications américaines de fin 2019 viennent enrichir la chrestomathie des solutions possibles.



■ Figure 1 : Schéma de principe du système de captation de l'énergie associée au rayonnement nocturne – Source : Raman & al (UCLA).

Capter l'énergie de la nuit

La première solution fonctionne la nuit et de préférence par ciel clair. Elle consiste à tirer parti du rayonnement nocturne, celui qui va expliquer le givre sur les voitures alors que la température de l'air n'a pas franchi la barre du zéro.

³ Le piégeage et la récolte de l'énergie - L'energy harvesting – André Deschamps et Jean-Pierre Hauet (REE 2015-1)

- Une équipe de chercheurs de l'UCLA (University of California) et de la Stanford University a montré, dans un article publié dans *Joule*⁴, qu'il était possible, par un montage du type de celui illustré par la figure 1, de tirer parti grâce à un dispositif thermoélectrique du refroidissement induit par la radiation nocturne et de récupérer une puissance de l'ordre de 25 mW/m² suffisante pour allumer une LED (photo en médaillon de la figure 2).

« De façon étonnante, explique le Dr Aaswath Raman, notre système permet de générer de l'électricité la nuit, quand les cellules solaires ne peuvent plus fonctionner ». Au-delà de l'éclairage, il pense que le système pourrait trouver des applications dans les zones éloignées, là où une source d'électricité électrique est nécessaire la nuit.



■ Figure 2 : Système de démonstration actionnant une LED – Source : Raman & Al (UCLA).

L'énergie des flocons de neige

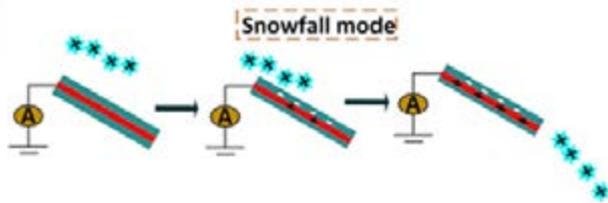
Tout aussi étonnant est le système de récupération de l'énergie portée par les flocons de neige, proposé par une autre équipe de l'UCLA⁵. Ce système utilise le fait que les flocons de neige sont chargés électriquement positivement. Cette énergie peut être récupérée par triboélectricité⁶ grâce à un système cherchant à relâcher des électrons.

Après plusieurs essais, l'équipe est arrivée à la conclusion que le bon matériau pour réaliser un TENG (*triboelectric nanogenerator*) fonctionnant à partir des flocons de neige, était le silicone. Celui a été déposé par impression 3D sur un substrat. L'ensemble forme alors une structure capable de récupérer l'énergie des flocons lorsque ceux-ci glissent sur le silicone selon le schéma de la figure 3.

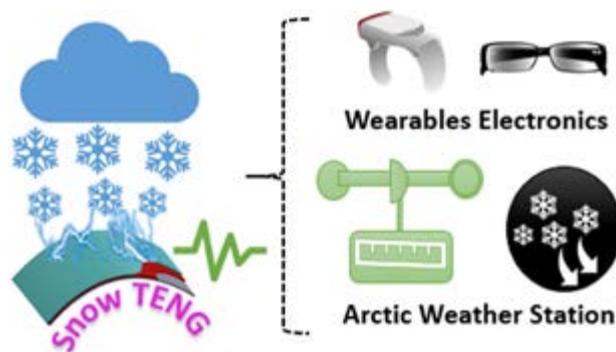
⁴ Generating Light from Darkness – Aaswath P. Raman, Wei Li et Shanhui Fan (*Joule* – September 12 2019)

⁵ All printable snow-based triboelectric nanogenerator – Abdelsalam Ahmed & al – Elsevier – *Nanoenergy* – Volume 60, June 2019.

⁶ La triboélectricité désigne le phénomène électrostatique créé par la mise en contact de deux matériaux de nature différente : une partie des électrons de la surface de contact d'un des deux matériaux est transférée à l'autre et ce transfert subsiste lors de la séparation. L'effet triboélectrique peut être augmenté par apport d'énergie mécanique en frottant les matériaux l'un contre l'autre (Wikipédia).



■ Figure 3 : Schéma de principe du système de récupération par triboélectricité de l'énergie électrique des flocons de neige – Source : Abdelsalam Ahmed & al.



■ Figure 4 : Schématique des TENG à neige et de leurs applications – Source : Abdelsalam Ahmed & al. (Elsevier).

Grâce à ce système, les auteurs de l'article affirment avoir récupéré une puissance électrique de 0,2 mW/m² avec un courant de 40 µA/m². Ils pensent que cette énergie est suffisante pour envisager diverses applications, dans le domaine des stations météorologiques isolées mais pourrait aussi trouver usage dans les vêtements, l'électronique et même dans la biomécanique (figure 4). ■ JPH

➤ Energies renouvelables : la France reste devant l'Allemagne mais le compte n'y est pas

C'est peu connu, mais la France précède toujours l'Allemagne en matière de recours aux énergies renouvelables. Mais il lui sera difficile d'atteindre l'objectif de 23 % d'EnR en 2020 qui lui a été imparti par l'Europe et auquel elle s'est engagée.

Une réglementation européenne assortie d'objectifs contraignants

L'accroissement de la part des énergies renouvelables dans la consommation finale brute est l'un des objectifs essentiels de la stratégie énergie-climat de l'Europe. Un objectif de 20 % au ni-

veau européen avait été retenu en 2009 pour l'horizon 2020. Il a été porté à 32 % en 2030 par la directive 2018/2001 du 11 décembre 2018 et il est possible que cet objectif soit à nouveau revu à la hausse dans le cadre du Pacte vert pour l'Europe actuellement en cours de discussion.

Cet objectif est globalement contraignant au niveau de l'Union européenne, c'est-à-dire que les Etats membres doivent fixer des contributions nationales permettant d'atteindre collectivement cet objectif et, en cas d'insuffisance de ces engagements nationaux ou en cas de dérive dans les résultats, la Commission européenne peut imposer des mesures correctives en conformité avec le règlement 2018/1999 relatif à la gouvernance de l'Union de l'énergie et de l'action pour le climat.

L'objectif global de l'Union européenne se décline en objectifs nationaux pour l'horizon 2020, qui deviennent au-delà des « parts de référence » que les Etats membres sont tenus d'atteindre et *a minima* de maintenir à compter du 1er janvier 2021. Si un Etat membre ne maintient pas sa part de référence sur n'importe quelle période d'un an, il doit prendre des mesures correctrices et encourt des sanctions financières prévues par le règlement 2018/1999.

La France a accepté dans le cadre de la directive de 2009 un objectif minimal de 23 % en 2020. Cet objectif a été repris dans la loi relative à la transition énergétique de 2015 ; la loi relative à l'énergie et au climat du 8 novembre 2019 l'a porté à 33 % au moins, pour l'horizon 2030. L'Allemagne de son côté a un objectif 2020, et donc « une part de référence », de 18 %. Comme tenu de enjeux et des discussions en cours sur le Pacte vert, il est important de savoir où nous en sommes.

La France devant l'Allemagne mais loin de son objectif

Ce tableau fait apparaître plusieurs points importants :

- globalement l'Europe est « dans les clous » de son objectif de 20 % pour 2020 puisque, dans la formation Europe des 28, elle atteignait 18,0 % en 2018 ;

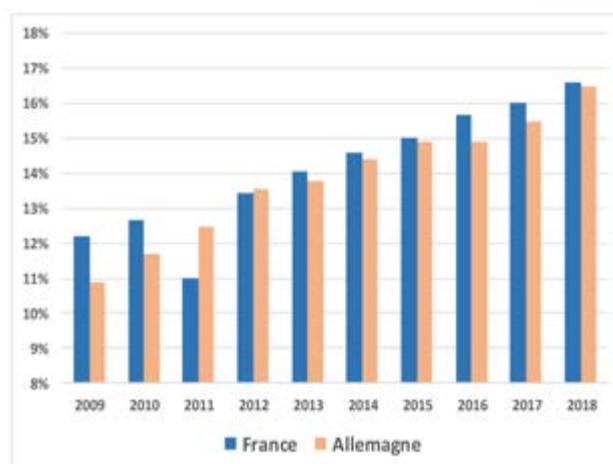


■ Figure 1 : Part des énergies renouvelables dans la consommation finale brute d'énergie des Etats membres et de l'Union en 2018 – Source : Eurostat.

- L'Allemagne a de bonnes chances d'atteindre son objectif de 18 %, ayant atteint 16,5 % en 2018 ;
- la France est éloignée de son objectif de 23 % puisque, bien qu'étant devant l'Allemagne en 2018, il lui reste un gap de 6,4 % à franchir en deux ans ;
- Pour l'Europe comme pour la France et l'Allemagne, l'objectif de 2030 est ambitieux. Il peut se révéler problématique s'il devait être renforcé par le Pacte vert.

En France comme en Allemagne, les progressions sont inférieures aux attentes mais posent davantage problème à la France

Pour entrer plus avant dans l'analyse des situations comparées de la France et de l'Allemagne, il convient d'examiner l'évolution de la situation au cours des dernières années. Les statistiques d'Eurostat permettent de dresser la figure 2.



■ Figure 2 : Evolution de la part des énergies renouvelables en France et en Allemagne, dans la consommation finale brute d'énergie, depuis 2009
Source : Eurostat.

On y voit que la part des EnR en % des consommations finales d'énergie croît en France de 0,49 % par en moyenne, tandis qu'elle croît en Allemagne de 0,61 %.

Ces incréments semblent faibles au regard de l'effort mené dans chacun des pays au profit des énergies renouvelables. En supposant que l'évolution de la part des EnR continue à se faire à un rythme pratiquement linéaire et au rythme ainsi constaté, nous parvenons à des projections pour 2030 de 23, 8 % pour l'Allemagne et 22,5 % pour la France. Entre-temps, l'Allemagne sera passée devant la France, l'avantage dont la France bénéficie du fait de son hydraulique venant à s'éteindre en valeur relative avec le temps.

Nous sommes loin dans les deux cas de l'objectif global de l'Europe de 32 % et la situation est particulièrement tendue pour la France qui aura dès 2020 du mal à atteindre son objectif de 23 % et qui va se retrouver avec une « part de référence » pouvant entraîner l'imposition par la Commission de mesures correctives. ■ JPH



John B. Goodenough

M. Stanley Whittingham

Akira Yoshino

© Niklas Elmehed, Nobel Media

Le prix Nobel de chimie 2019 récompense les inventeurs de la batterie Li-ion

Le prix Nobel de chimie 2019 a été décerné à John B. Goodenough, M. Stanley Whittingham et Akira Yoshino pour leurs contributions au développement de la batterie lithium-ion rechargeable qui constitue un élément essentiel pour le développement des moyens de communication nomades et des véhicules électriques.

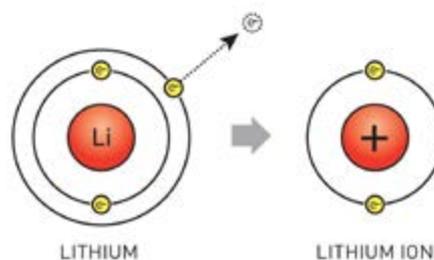
Le lithium, un des plus anciens éléments de la planète joue un rôle central dans l'attribution du prix Nobel de chimie 2019. Découvert par deux chimistes suédois en 1817, c'est le solide le plus léger de tous les éléments (numéro atomique 3). C'est l'un des métaux de la colonne des alcalins dont la structure électronique avec un seul électron dans sa couche extérieure rend cet élément extrêmement réactif (**figure 1**). C'est cette réactivité imputable à sa forte propension à perdre son électron unique, qui a été mise à profit, en premier lieu par Stanley Whittingham au début des années 70 pour concevoir et réaliser la première batterie fonctionnelle.

Puis John Goodenough parvint à doubler la tension de sortie de la batterie rendant ainsi le dispositif plus puissant et intéressant pour les applications pratiques. Enfin en 1985, Akira Yoshino réussit en n'utilisant

plus que les ions Li^+ , à éliminer le lithium pur de la batterie qui était responsable de départs de feu voire d'explosions intempestives qui empêchaient son développement industriel.

portables, des appareils mobiles, des véhicules électriques ainsi que le stockage de l'énergie solaire ou éolienne. C'est cette contribution essentielle au « bien de l'humanité », pour reprendre la

1 H		
3 Li	4 Be	
11 Na	12 Mg	
19 K	20 Ca	21 Sc
37 Rb	38 Sr	39 Y



© Johan Jarnestad/The Royal Academy of Sciences

Figure 1 : Position dans le tableau de Mendeleïev et structure électronique du lithium.

La levée de ce verrou allait permettre une mise sur le marché rapide de ces batteries à partir des années 90 contribuant notamment au développement des ordinateurs

formule figurant dans le testament d'Alfred Nobel et reprise pour l'occasion par le Comité Nobel, qui a valu aux trois chercheurs cette distinction suprême.

Historique des batteries au lithium

Le précurseur et l'inventeur : Stanley Whittingham

A partir du milieu du 20^e siècle, l'augmentation drastique des véhicules automobiles à essence a provoqué une dégradation sensible de la qualité de l'air dans les grandes métropoles et participé au dérèglement climatique. En même temps le monde a pris conscience du caractère fini et donc épuisable de la ressource pétrolière. Ce double constat finit par alerter à la fois le monde des constructeurs automobiles et celui des grandes compagnies pétrolières. Pour préparer un avenir qui s'annonçait problématique, il devenait urgent d'investir dans la filière des véhicules électriques et plus généralement dans des sources d'énergie alternatives.

Ces nouveaux objectifs demandaient de disposer de batteries puissantes capables de stocker des quantités importantes d'énergie électrique. Or à l'époque, on n'avait à sa disposition que deux types de batteries rechargeables : les lourdes et encombrantes batteries au plomb dont l'invention remontait au milieu du 19^e siècle (Planté, 1859) et les batteries au nickel-cadmium développées au siècle dernier dans les années 30. Des sociétés comme Exxon décidèrent donc de diversifier leurs activités en investissant massivement en recherche et en donnant carte blanche à des chercheurs réputés dans le domaine énergétique, à condition qu'ils ne fassent pas appel à des ressources pétrolières ! Stanley Whittingham fut l'un de ces pionniers recrutés par Exxon, fort de l'expérience acquise à l'université de Stanford où il avait étudié certains composés d'intercalation caractérisés par le piégeage d'ions chargés dans des cavités de taille atomique. En travaillant sur le disulfure de tantale TaS₂ pour étudier ses propriétés supraconductrices, il fut amené à intercaler des ions potassium (K⁺) pour observer la variation de conductibilité induite. Le résultat fut un matériau de cathode à très haute densité d'énergie, délivrant une tension de 2 volts, soit plus

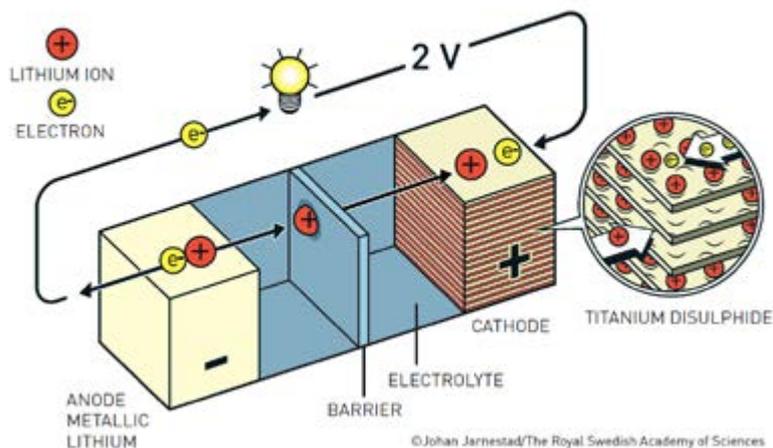


Figure 2 : La batterie au lithium de Whittingham développée par Exxon (1976).

“A partir du milieu du 20e siècle, l'augmentation drastique des véhicules automobiles à essence a provoqué une dégradation sensible de la qualité de l'air dans les grandes métropoles et participé au dérèglement climatique.”

que la moyenne des batteries disponibles à l'époque. Le tantale étant un élément trop lourd, il ne tarda pas à le remplacer par du titane, aux propriétés voisines mais bien plus léger. Et pour l'électrode négative (l'anode), il choisit le lithium, l'élément le plus enclin à céder un électron. Il en résulta la première batterie au lithium rechargeable fonctionnant à la température ordinaire susceptible de délivrer une différence de potentiel relativement élevée (figure 2). Conquis par ce résultat exceptionnel, Exxon décida sur le champ d'exploiter cette batterie industriellement.

L'avantage de cette batterie par rapport aux premières batteries rechargeables tenait au fait qu'au lieu d'avoir des électrodes solides qui se délitaient au fur et à mesure qu'elles réagissaient avec l'électrolyte, les ions lithium pouvaient être stockés dans des espaces protégés au sein de la cathode de disulfure. Pendant l'utilisation, les ions migrent depuis l'anode qui fournit les

ions Li⁺ vers la cathode et le phénomène est réversible.

Malheureusement ce modèle, parfait sur le papier, fut contrecarré par la pratique. En effet après un certain nombre de charges successives, des dendrites de lithium croissent à la surface de l'anode qui peuvent venir à la longue provoquer des courts-circuits avec la cathode, voire provoquer une explosion (figure 3).

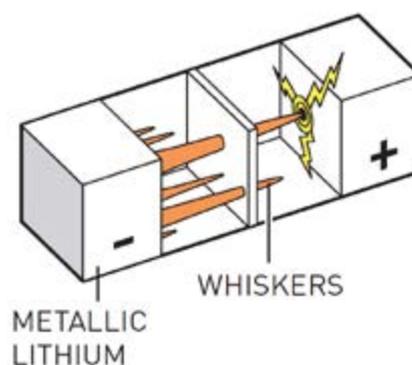


Figure 3 : Formation des dendrites de lithium.

●●● Pour rendre le dispositif plus sûr, de l'aluminium fut ajouté à l'électrode de lithium métallique et on changea d'électrolyte. Annoncée en 1976, la batterie de Whittingham ainsi améliorée commença à faire l'objet d'une production en petite série pour un horloger suisse désireux d'utiliser l'énergie solaire pour l'alimentation de certains de ses modèles de montres. L'objectif suivant était de pousser les performances de la batterie afin de pouvoir alimenter un véhicule électrique. Mais dans le même temps, le prix du pétrole avait chuté brutalement au début des années 80 ce qui amena Exxon à opérer des restrictions de crédit. Le développement de la batterie de Whittingham fut stoppé et le brevet concédé à plusieurs compagnies dans le monde.

Le renforcement de la puissance des batteries grâce au matériau de cathode développé par John Goodenough

C'est à ce moment que Goodenough prit le relais. Ce mathématicien à l'origine s'était tourné vers la physique et avait passé plusieurs années au Lincoln Laboratory du MIT, notamment consacrées au développement de mémoires RAM. Ce chercheur très sensibilisé par la perspective de l'épuisement progressif des réserves mondiales de pétrole, souhaitait apporter sa pierre au développement de sources alternatives d'énergie, ce qu'il ne pouvait pas faire dans un laboratoire essentiellement financé par l'Armée de l'air américaine. Il accepta alors une proposition de poste de professeur à l'université d'Oxford qui allait lui permettre de se consacrer à son thème de prédilection.

Goodenough était au courant de la batterie révolutionnaire proposée par Whittingham mais il pressentait qu'on pourrait fortement améliorer le potentiel délivré par la cathode en utilisant un oxyde métallique à la place d'un sulfure. Le challenge était de trouver un oxyde susceptible de fournir un voltage élevé par intercalation d'ions lithium mais qui ne se désintègre pas lorsque les ions en sont sortis. Avec l'oxyde de cobalt et de lithium, Li_xCoO_2 , il

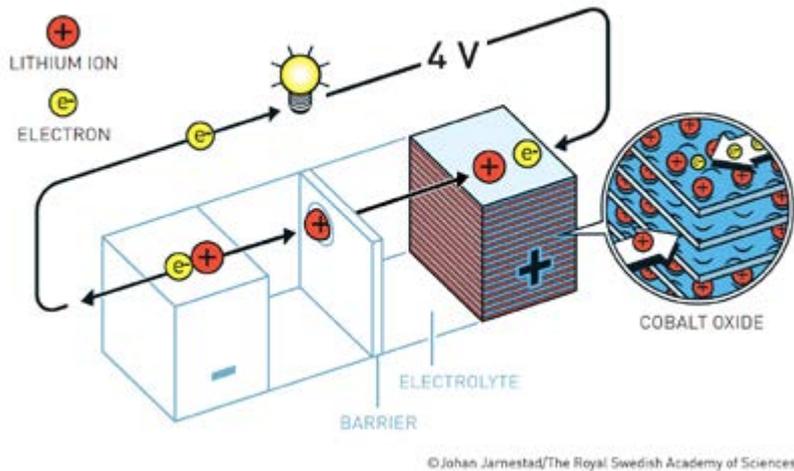


Figure 4 : La batterie Li-ion de Goodenough. L'oxyde de cobalt et de lithium a permis un doublement de la tension délivrée.

s'aperçut que l'on pouvait atteindre un voltage de quatre volts au lieu des deux volts de la batterie de Whittingham. Une des clés du succès tenait à ce que les batteries n'avaient pas à être fabriquées dans l'état chargé comme les précédentes mais pouvaient être chargées juste avant emploi. Grâce à l'utilisation de ce nouveau matériau de cathode à forte densité d'énergie, John Goodenough put donc annoncer en 1980 la mise au point d'une batterie à fort potentiel et de haute capacité et ce malgré son faible poids, ce dernier point constituant bien sûr un atout considérable pour le développement des appareils nomades (figure 4).

saient en raison de la chute des prix pétroliers, en Asie, notamment au Japon, il en allait tout autrement. Les grandes compagnies de l'électronique recherchaient activement des batteries rechargeables de faible poids, capables d'alimenter toute une panoplie de dispositifs innovants : caméras, téléphones sans fil, ordinateurs, etc. Akiro Yoshino, employé par la Société Asahi Kasei, flaira, comme il se plaît à le dire, un créneau porteur dans lequel il s'engouffra. Il reprit le schéma de base de la batterie de John Goodenough en faisant porter l'effort cette fois-ci sur l'anode afin de pouvoir mettre en œuvre le principe des batteries « rocking chair »

“Le lancement commercial des premières batteries au lithium de type Yoshino par Sony démarra en 1991 révolutionnant du même coup l'industrie électronique.”

Akiro Yoshino propose un matériau d'anode permettant de mettre en œuvre le concept de « rocking chair »

Tandis qu'à l'Ouest les investissements dans les technologies d'énergies alternatives et les véhicules électriques faiblis-

imaginé par le Français Armand dès la fin des années 1970. Dans ce schéma, les ions conducteurs oscillent au gré des charges et décharges entre l'anode et la cathode qui doivent alors toutes deux être constituées de matériaux d'intercalation. Il testa pour l'anode plusieurs matériaux à base de carbone. Le graphite dont on avait

montré préalablement qu'il pouvait intercaler sans difficulté des ions de lithium ne convenait pas car il se désagrégeait rapidement sous l'effet de l'électrolyte. La solution finalement retenue fut d'utiliser un coke de pétrole, un sous-produit du raffinage. En effet, après avoir chargé en électrons ce coke (qui ressemble au charbon), les ions de lithium pénètrent facilement dans le matériau. Lorsqu'on met la batterie en fonctionnement, les électrons et les ions lithium migrent vers l'oxyde de cobalt de la cathode assurant un fonctionnement régulier du dispositif avec une tension délivrée élevée. La batterie développée par Yoshino (**figure 5**) était donc stable, de faible poids, et produisait une tension de 4 volts.

Ce fut la première « vraie » batterie développable industriellement à grande échelle car elle présentait d'excellentes caractéristiques

“Depuis la suppression du lithium pur comme constituant d'électrode, le handicap majeur du risque d'incendie ou d'explosion a pratiquement disparu dans des conditions de fonctionnement normal.”

Épilogue

Ainsi les efforts successifs des trois lauréats du prix Nobel 2019 qui auront apporté chacun une pièce décisive à l'édifice, ont permis au prix de raffinements successifs dans la structure et les matériaux employés, de découvrir puis de développer en l'espace de deux décennies seulement, des batteries au lithium capables de couvrir l'ensemble des besoins émergents en cette fin de 20^e siècle. L'un

des applications fortement consommatrices d'énergie.

Par ailleurs, depuis la suppression du lithium pur comme constituant d'électrode, le handicap majeur du risque d'incendie ou d'explosion a pratiquement disparu dans des conditions de fonctionnement normal. Yoshino considère que le premier test de sécurité réussi a été le véritable acte de naissance de la batterie au lithium. Depuis ces travaux fondateurs, les chercheurs du monde entier ont continué la chasse aux matériaux miracles pour améliorer les batteries lithium-ion. Mais pour l'instant aucune rupture de technologie n'est en vue. Les progrès restent notables mais mesurés, portant plus sur l'amélioration de l'empreinte environnementale des matériaux utilisés que sur les performances intrinsèques du dispositif. Pour plus d'informations sur les pistes les plus prometteuses, le lecteur pourra se reporter aux articles parus sur le sujet dans la REE ¹.

Enfin il est à noter que si trois lauréats ont été récompensés à juste titre pour leurs résultats remarquables sur les batteries Li-ion, les chênes ne doivent pas pour autant cacher la forêt. De nombreuses équipes ont, en même temps que ces précurseurs, et un peu partout dans le monde et en particulier en France, obtenu des résultats notables dans ce domaine et fait progresser la connaissance des processus complexes au voisinage des électrodes des batteries Li-ion. ■

Alain Brenac

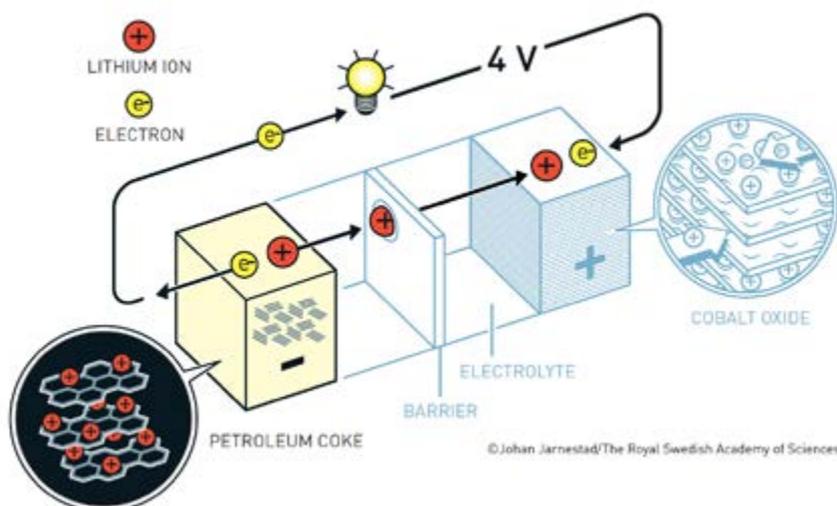


Figure 5 : Schéma de la batterie mise au point par Akira Yoshino. On notera l'anode originale à base de coke de pétrole.

en termes de cycles de chargement, donc de durée de vie sur une longue période. Le lancement commercial des premières batteries au lithium de type Yoshino par Sony démarra en 1991 révolutionnant du même coup l'industrie électronique. Ce développement devint vite exponentiel avec la miniaturisation rapide des téléphones mobiles, microordinateurs et appareils MP3.

des atouts majeurs de ce type de dispositifs est que leur fonctionnement ne repose pas sur des réactions chimiques altérant les électrodes, comme c'était le cas des générations de batteries précédentes. La migration régulière des ions Li⁺ dans un sens de circulation et dans l'autre garantit désormais une durée de vie acceptable, autorisant des centaines de recharges successives, y compris pour

¹ D. Bloch, G. Lefèvre « Les matériaux requis par les batteries Li-ion » REE 2019-4.

- J-P. Hauet « L'Europe des batteries : de quoi s'agit-il ? Où en est-on ? » REE 2019-3

Contribution des chercheurs français à la conception des premières batteries à électrode négative de lithium

Le rapport d'évaluation des travaux des trois lauréats du prix Nobel de chimie 2019 publié par la Royal Swedish Academy of Sciences ¹ fait référence aux travaux de Jean Rouxel & al à l'université de Nantes sur les phénomènes d'intercalation publiés dès 1973 ² et, plus tard, à ceux de Michel Armand & al sur l'utilisation de tels matériaux pour la réalisation de batteries ³. Le rappel de ces travaux nous amène à préciser quelle a été la contribution des chercheurs français au développement des batteries Li-ion, contribution malheureusement interrompue au début des années 1980 par l'absence d'aval industriel à même de supporter leurs travaux.

La réversibilité de l'intercalation permet d'affirmer dès le début des années 70 qu'il est possible de contrôler la circulation des électrons par voie électrochimique externe dans des dispositifs de type batteries. Il faut pour cela disposer d'un électrolyte stable face au lithium métallique et par ailleurs capable de solvater un sel de lithium pour en assurer le transport ionique. Cette annonce est faite sur le lac majeur en 1972 par Michel Armand et Brian Steele qui anticipe l'usage du disulfure de titane TiS₂. S. Whittingham, alors ingénieur chez Exxon, assiste à cette conférence et mesure l'enjeu commercial des propositions faites.

Mais la réalisation d'une batterie exige de rassembler tous ces éléments dans un dispositif capable de réaliser des centaines de cycles à grande profondeur de décharge (DOD). Sur les conseils de Jean Rouxel (†1998) et de Michel Armand, les études industrielles débutent en 1976 au Laboratoire de la CGE à Marcoussis avec des systèmes de type LiAl / LiClO₄-éther/LixNiPS₃. Des batteries fonctionnent bientôt avec des performances prouvant la pertinence des anticipations. Des performances commercialement utilisables seront obtenues dès

le début des années 80 avec des batteries en géométrie bouton réalisant 300 cycles pour 50 % de DOD pour des capacités voisines de 10 mAh au régime de C/5. Des résultats semblables seront obtenus avec des oxydes 10 ans plus tard après des travaux fondamentaux menés tant dans le laboratoire de chimie du solide de Bordeaux (Equipe C. Delmas en partenariat avec J. Goodenough) que dans celui de Nantes (Equipe D. Guyomard du Laboratoire J. Rouxel/M. Tournoux). Dopées par l'usage des oxydes dans les batteries commerciales et les besoins en performance des technologies du futur, de nombreuses études académiques et R&D se poursuivent toujours aujourd'hui en particulier autour des positives à base d'oxydes et phosphates métalliques substitués et des négatives en métal alcalin et alliages à haute énergie, Na-ion, Mg-ion, Li-S et métal-air.

Comme l'avait explicité M. Armand (par ailleurs promoteur des électrolytes solides polymères) dès la conception des premières batteries, l'alliage constituant temporairement l'électrode négative (LiAl) devrait à terme être industriellement remplacé pour des raisons de sécurité par un intercalaire du graphite ou un de ses dérivés. Les Laboratoires de Marcoussis étaient d'ailleurs bien au fait de ces questions car en partenariat depuis longtemps avec la société Carbone Lorraine entre autres. C'est dans les années 80 que le Japonais Akira Yoshino, de Asahi Kasei Corporation, est intervenu, avec le succès qui lui vaut aujourd'hui le prix Nobel, dans le développement industriel des batteries Li-Ion non pas en France ou aux Etats-Unis, malgré la détermination de l'action de recherche des Bell Labs, autour de D. Murphy, mais au Japon.

“ Cette saga des batteries Li-ion s'est déroulée dans le cadre d'une collaboration étroite entre les milieux académiques et industriels. ”

Ainsi, la création des premières batteries au lithium à anode alors en lithium métallique (1970-1990) avait vu coopérer dans une compétition à fleurets mouchetés une équipe sénior anglo-saxonne autour de J. Goodenough et Exxon et une équipe junior française autour de J. Rouxel et la CGE-Marcoussis. C'est l'équipe sénior qui a emporté le prix Nobel. La France n'en a pas moins joué un rôle très important dans cette aventure créatrice extraordinaire marquée par la synthèse de multiples matériaux d'électrodes et d'électrolyte originaux

et par la connaissance approfondie de leurs caractéristiques physico-chimiques et cinétiques tant à Nantes et Grenoble qu'à Bordeaux mais aussi par la réalisation des premières batteries capables de cyclage profond.

Cette saga des batteries Li-ion s'est déroulée dans le cadre d'une collaboration étroite entre les milieux académiques et industriels comme le montre le nom des porteurs de projet entre 1970 et 1985: J. Goodenough (Oxford), J. Rouxel (Nantes), M. Armand (Grenoble), C. Delmas (Bordeaux), S. Whittingham (Exxon) et Alain Le Méhauté (CGE-Marcoussis).

Les batteries Li-ion seront finalement développées industriellement au Japon. Du fait du désengagement industriel français, M. Armand partira pour le Québec après la vente de ses brevets par le CNRS alors qu'A. Le Méhauté abandonnera en 1984 ses travaux sur les batteries au lithium pour se consacrer, entre autres, à la mise au point de la reprographie 3D. ■

Jean-Pierre Hauet

Ancien directeur général des Laboratoires de Marcoussis

¹ <https://www.nobelprize.org/uploads/2019/10/advanced-chemistryprize2019-2.pdf>

² Bichon, J.; Danot, M.; Rouxel, J. Systematique Structurale Pour Les Series d'intercalaires Mxtis₂ (M= Li, Na, K, Rb, Cs). Comptes Rendus Acad. Sci., Ser. C, Sci. Chim. 1973, 276, 1283-1286.

³ Armand, M. B. Intercalation Electrodes. In Materials for Advanced Batteries. NATO Conf. Ser. (VI Mater. Sci.); Murphy, D. W., Broadhead, J., Steele, B. C. H., Eds.; Springer, Boston, MA, 1980, 2, 145-161.
Armand, M.; Touzain, P. Graphite Intercalation Compounds as Cathode Materials. Mater. Sci. Eng. 1977, 31, 319-329.



Le pacte vert pour l'Europe

« Le pacte vert pour l'Europe est notre nouvelle stratégie de croissance. Il nous aidera à réduire les émissions tout en créant des emplois. »

Ursula von der Leyen, présidente de la Commission européenne.

Une nouvelle ambition pour l'Europe

Avec l'arrivée d'un nouveau Parlement européen, issu des élections de mai 2019, une nouvelle Commission européenne (CE) a été mise en place fin 2019, avec à sa tête une nouvelle présidente, Ursula von der Leyen.

« Le pacte vert pour l'Europe », ou Green Deal, publié le 11 décembre 2019¹, fixe les priorités de cette nouvelle Commission européenne pour la période 2019-2024. Il s'inscrit dans le sillage du paquet « Une énergie propre pour tous les européens », ou Clean Energy Package, dont les derniers textes ont été approuvés au début de l'année 2020.

¹ https://ec.europa.eu/info/sites/info/files/european-green-deal-communication_fr.pdf

Ce pacte est porteur d'une grande ambition environnementale : faire de l'Europe le premier continent neutre sur le plan climatique, c'est-à-dire ne plus émettre de gaz à effet de serre d'ici 2050. Selon la CE, le pacte vert constitue un grand défi, mais aussi une formidable opportunité pour l'Europe. Il intègre le concept de durabilité dans tous les socles des activités de l'Union européenne (UE) qui vont de la stratégie industrielle à l'aide au développement. La conduite du pacte vert est confiée à Frans Timmermans, premier vice-président exécutif de la CE.

Le contenu du pacte

Avec le pacte vert, au-delà de la neutralité climatique en 2050, la Commission européenne s'engage dans des transformations à un rythme soutenu, afin d'atteindre un niveau de réduction

des émissions de gaz à effet de serre de 50%, au moins, en 2030. Le défi étant de transformer l'économie de l'Union européenne pour assurer à tous un avenir durable.

Cela se traduira par l'établissement de nouvelles politiques dans les domaines de l'énergie, de l'industrie, des grandes infrastructures, des transports, de l'alimentation, de l'agriculture ou encore de la construction, sans oublier la fiscalité et les prestations sociales, tout ceci dans le respect des écosystèmes naturels et avec le souci de l'amélioration de la santé humaine.

Le pacte vert, c'est une feuille de route et 50 actions qui toucheront tous les secteurs, réparties selon huit axes :

- renforcer l'ambition climatique de l'UE pour 2030 et 2050 ;
- fournir une énergie propre, abordable et sûre ;



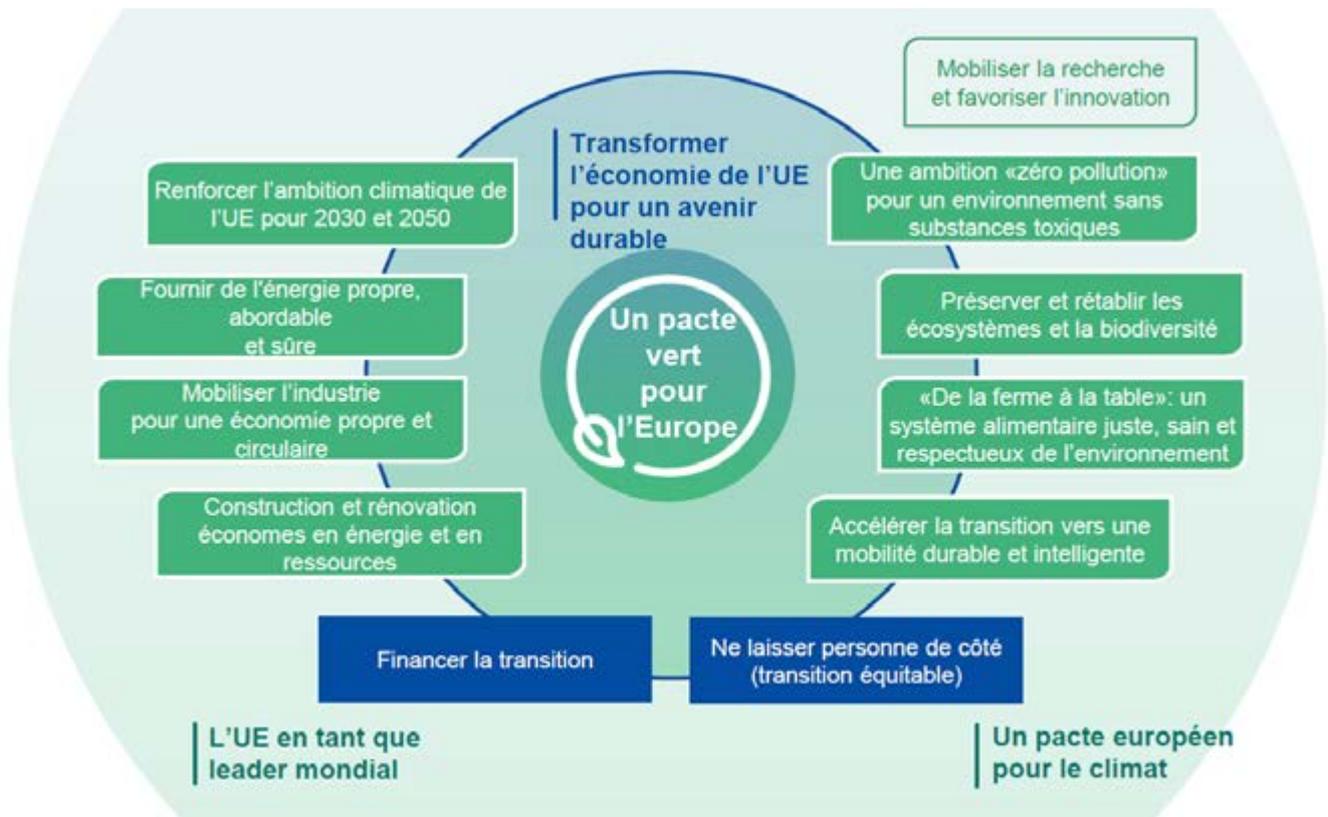


Figure 1 : Le pacte vert pour l'Europe - Source : Commission européenne, COM(2019) CE du 11 décembre.2019).

- mobiliser l'industrie en faveur d'une économie circulaire et propre ;
- promouvoir des constructions et rénovations économes en énergie et en ressources ;
- accélérer la transition vers une mobilité durable et intelligente ;
- concevoir un système alimentaire juste, sain et respectueux de l'environnement ;

- préserver et rétablir les écosystèmes et la biodiversité ;
- avoir une ambition « zéro pollution » pour un environnement exempt de substances toxiques.

Avec ce pacte vert, l'Union européenne souhaite permettre aux entreprises européennes et leurs collaborateurs de devenir des acteurs de premier plan au niveau mondial, dans le domaine des

produits et des technologies respectueux de l'environnement.

Les secteurs impactés

Pour atteindre l'objectif de neutralité climatique, tous les secteurs de l'économie seront mobilisés et plus particulièrement: l'énergie, le bâtiment, l'industrie, l'agriculture et les transports.

L'énergie

Dans ce domaine, à l'origine de plus de 75% des émissions de gaz à effet de serre dans l'UE, il s'agit prioritairement d'en réduire l'ampleur. Le charbon devrait être abandonné et des solutions trouvées pour réduire l'empreinte carbone du gaz combustible. Les sources d'énergie reposeront largement sur les sources renouvelables, ainsi la production d'énergie éolienne en mer sera-t-elle encouragée. Des mécanismes de

“Avec ce pacte vert, l'Union européenne souhaite permettre aux entreprises européennes et leurs collaborateurs de devenir des acteurs de premier plan au niveau mondial, dans le domaine des produits et des technologies respectueux de l'environnement.”

financement seront déployés pour faire face au risque de précarité énergétique des citoyens.

Le bâtiment

Sachant que le bâtiment représente 40 % de la consommation d'énergie, la législation relative à la performance énergétique sera renforcée et le prix des différentes sources d'énergie mise en corrélation avec leur efficacité. Le but est d'encourager la rénovation des bâtiments existants pour diminuer leur consommation d'énergie.

L'industrie

L'industrie européenne n'utilise actuellement que 12 % de matériaux recyclés. Une stratégie industrielle va donc être définie, incluant notamment un plan d'action spécifique en faveur de l'économie circulaire, encourageant le recyclage. Le pacte prévoit d'aider les entreprises à innover et à devenir des acteurs de premier ordre au niveau mondial, dans le domaine de l'économie verte. Les secteurs de l'industrie à forte intensité énergétique, tels que la sidérurgie, l'industrie chimique et l'industrie du ciment, devront se moderniser pour réduire leur empreinte carbone.

L'agriculture et la pêche

Dans une stratégie nommée « De la ferme à la table », la Commission européenne présentera au printemps 2020, les mesures à engager pour garantir que les citoyens bénéficient d'une alimentation durable et abordable. Ces mesures viseront aussi à préserver la biodiversité et à donner plus d'importance à l'agriculture biologique. En l'occurrence, il s'agira de développer des techniques innovantes de production agricole et de pêche, pour réduire la dépendance aux pesticides chimiques, aux engrais et aux antibiotiques.

Les transports

Les transports représentent 25 % des émissions de gaz à effet de serre. La stratégie sera de déployer des

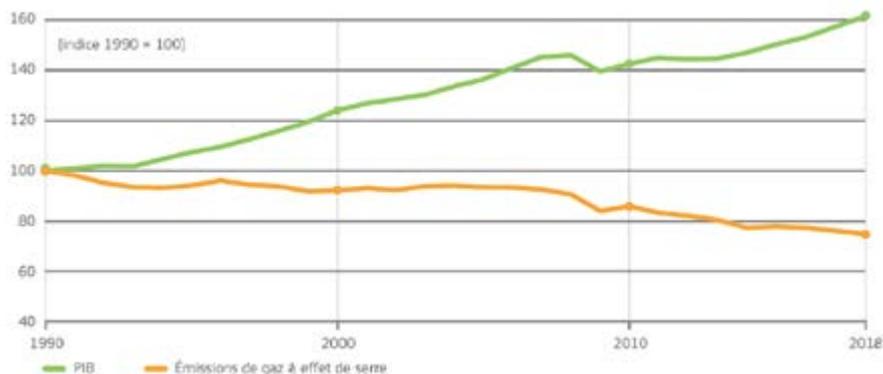


Figure 2 : Evolution des GES et du PIB – Source : Commission/presscorner/detail/fr/fs_19_6

moyens de transport plus propres, moins chers et plus sains. Les mesures à mettre en place doivent viser une réduction de 90 % des émissions dans ce secteur d'ici 2050. Ainsi, un million de stations de recharge destinées aux véhicules électriques devraient être déployées en Europe d'ici 2025. L'utilisation de l'hydrogène sera encouragée pour les transports terrestres, maritimes et aériens. Le fret

alors que le PIB de l'Union avait augmenté de 61 % sur la même période. Toutefois, cette diminution doit être amplifiée pour atteindre l'objectif de neutralité climatique en 2050. L'objectif intermédiaire de réduction des gaz à effet de serre, fixé jusqu'à présent pour 2030 à 40% par le Clean Energy Package, devrait passer à 50 %, voire 55 %. Ce point devrait être clarifié avant l'été 2020.

“Au cours de la prochaine décennie, le plan d'investissement associé prévoit de mobiliser au moins mille milliards d'euros d'investissements durables.”

intérieur qui passe actuellement à hauteur de 75 %, principalement par la route, devrait être progressivement remplacé par le rail et les voies fluviales. Ce qui nécessitera une adaptation préalable de ces voies.

L'évolution des gaz à effet de serre

L'Union européenne a déjà démontré par le passé qu'elle pouvait réduire ses émissions de gaz à effet de serre tout en maintenant la croissance économique. En 2018, elles étaient inférieures de 23 % à celles de 1990,

Les moyens à mobiliser

Pour concrétiser l'ambition fixée par le pacte vert, les besoins en investissements sont considérables. Au cours de la prochaine décennie, le plan d'investissement associé prévoit de mobiliser au moins mille milliards d'euros d'investissements durables.

Ce plan devrait aider les administrations publiques et les promoteurs de projets à identifier, structurer et exécuter des projets durables. En particulier, cent milliards d'euros seront affectés à l'aide aux pays qui sont actuellement les plus fortement dépendants des énergies fossiles telles que le charbon. ●●●



Figure 3 : Calendrier des premières actions engagées par la CE.

“Au cours de l’été 2020, il est prévu de réviser l’objectif de réduction de gaz à effet de serre fixé pour 2030. Un calendrier plus complet des actions à engager devrait être diffusé d’ici la fin de l’année 2020.”

●●● La CE a proposé de porter à 25 % la part consacrée à l’intégration des questions climatiques dans tous les programmes de l’UE, par exemple dans le fonds européen agricole pour le développement durable. Les politiques européennes seront revisitées pour orienter les ressources financières vers les actions relevant du développement durable. La formation, la réglementation et l’innovation, en particulier la transformation numérique, vont être utilisées comme leviers pour stimuler les changements attendus. En matière de recherche-développement, un budget de plus de cent milliards d’euros, soit au moins 35 % du budget d’ Horizon Europe, va être consacré aux projets en lien avec le pacte vert pour la période 2021-2027.

Le calendrier

En mars 2020, un « pacte européen pour le climat » devrait être proposé pour inscrire dans la législation européenne l’objectif de neutralité climatique à l’horizon 2050.

Au cours de l’été 2020, il est prévu de réviser l’objectif de réduction de gaz à effet de serre fixé pour 2030. Un calendrier plus complet des actions à engager devrait être diffusé d’ici la fin de l’année 2020. Les citoyens seront mobilisés par le biais de trois moyens de communication. Tout d’abord, une action de sensibilisation à l’impact du changement climatique va être engagée. Ensuite, les citoyens auront la possibilité de proposer des idées. Enfin, les initiatives de terrain vont être mieux partagées et l’échange de bonnes pratiques encouragé.

Relations avec le reste du monde

En adoptant ce pacte vert, l’Europe s’engage à montrer l’exemple. Toutefois, une action isolée serait dérisoire sans engagement des autres régions du monde. Un mécanisme d’ajustement carbone aux frontières sera proposé par la Commission afin que les efforts de baisse des émissions de carbone, imposés aux entreprises européennes, s’appliquent

aussi à celles qui exportent vers l’Europe. L’Union européenne va également travailler avec l’Afrique, afin de placer les enjeux liés au climat et à l’environnement au centre de leurs relations. L’UE prévoit par ailleurs d’entamer un dialogue sur le climat avec tous les pays du G20, sachant qu’ils sont à eux seuls responsables de 80 % des émissions mondiales de gaz à effet de serre. Plus proche de l’Europe, un programme environnemental spécifique va être établi avec les pays des Balkans occidentaux, sans oublier les pays du voisinage méridional avec lesquels un partenariat sera établi sur l’environnement, l’énergie et le climat.

Enfin, des alliances vertes seront nouées en Amérique latine, dans les Caraïbes, en Asie et dans le Pacifique.

Le changement climatique et la dégradation de l’environnement constituent une menace pour tous, comme l’ont montré encore dernièrement les grands incendies qui ont ravagé l’Australie à la faveur de chaleurs record. A l’instar du New Deal de Roosevelt, le Green Deal européen a l’ambition de relancer l’économie en Europe, pour la rendre moderne, compétitive, durable et résiliente, face aux aléas climatiques et environnementaux dans l’avenir. Il reste à démontrer que l’Europe sera capable de réunir les moyens considérables qu’implique le pacte vert et que cette mobilisation ne se fera pas aux dépens de la croissance économique dont l’Europe a toujours besoin. ■

Gérald Sanchis



Photo 1: Le porte-avions Charles de Gaulle en avril 2019

© Wikipédia (Par U.S. Marine Corps photo by Maj. Joshua Smith)

Les défis de la construction d'un nouveau porte-avions

Les porte-avions sont, depuis la deuxième guerre mondiale, des éléments essentiels des forces navales. On se souvient qu'alors qu'ils étaient absents de Pearl Harbour le jour de l'attaque, ils avaient ensuite contribué grandement à la supériorité des Etats-Unis sur le Japon.

Ces bâtiments de guerre, souvent de très importants tonnages, allant jusqu'à plusieurs dizaines de milliers de tonnes, sont devenus des vecteurs stratégiques, pouvant projeter une puissance navale et aérienne n'importe où sur la planète afin de marquer une influence et une puissance militaire. Mais, au-delà du Charles de Gaulle mis en service en 2001, les décisions d'inscrire un second porte-avions dans une loi de programma-

tion militaire n'ont cessé d'être tour à tour annoncées puis annulées ou repoussées. C'est que les enjeux d'une telle décision sont lourds financièrement, politiquement et techniquement, tous les présidents de la République y ont été confrontés.

Les porte-avions et les décisions politiques

Le porte-avions demeure pour la France un outil de puissance diplomatique et militaire. Du Liban à la guerre Iran-Irak dans les années 80, en passant par l'ex-Yougoslavie la décennie suivante, puis l'intervention en Afghanistan en 2001, la Libye en 2011 et ces dernières années la lutte contre l'état Islamique au Levant, le Clémenceau, le Foch puis le Charles de Gaulle ont démontré à de multiples reprises l'intérêt d'une présence aéronavale dans l'arsenal des moyens militaires français. Ayant la capacité à se déployer rapidement et partout dans le monde et la liberté de naviguer dans les eaux internationales, le porte-avions est une force de frappe majeure, mobile et particulièrement endurante, capable de se

positionner au plus près des zones de crise, d'y rester le temps qu'il faut en toute autonomie et d'y remplir des missions variées, allant de la simple présence dissuasive à un engagement de haute intensité.

Mais depuis 20 ans, La France ne dispose plus de la permanence opérationnelle d'un groupe aéronaval, conséquence du désarmement du Clémenceau en 1997 puis de la vente du Foch au Brésil en 2000. Un an plus tard, le Charles de Gaulle est entré en service mais le programme, qui devait initialement comprendre deux bâtiments pour succéder aux précédents porte-avions, s'est arrêté là. Depuis, la France ne peut compter que pendant environ 60 % du temps sur cet outil militaire et politique majeur, alors même que l'effort global dans la force aéronavale a été accompli à 80 %, les appareils du groupe aérien embarqué ayant un format calibré sur la capacité à être déployés à n'importe quel moment sur un porte-avions, qu'il y en ait un ou deux.

Une seconde plate-forme aurait essentiellement vocation à assurer la permanence du groupe aéronaval, c'est-à-dire à être certain de disposer d'un bâtiment pendant

●●● les périodes d'indisponibilité technique de l'autre. C'est pourquoi la décision de lancer un deuxième porte-avions se pose régulièrement aux autorités politiques depuis une vingtaine d'années. Au gré des rapports parlementaires et des alternances politiques, le deuxième porte-avions a été discuté à de multiples reprises. En 2003, la propulsion nucléaire est choisie mais la perspective d'une étude commune avec les Britanniques décale le projet et le projet revient à la propulsion classique qui est la solution choisie par la Royal Navy. Mais d'autres considérations, comme les types de chasseurs équipant les porte-avions, vont faire capoter la coopération. Les Britanniques ont en effet prévu d'équiper leur porte-avions de F-35 (JSF) à décollage court et à atterrissage vertical alors que le Français accueille le Rafale marine dont le décollage est classique et s'effectue avec une catapulte. A la fin de la décennie 2000, le contrat d'étude était toujours en attente et n'a guère avancé au début de la décennie suivante. La question du second porte-avions est donc toujours pendante.

Problématique française

Quelques mois après la dernière élection présidentielle, quatre études, d'une durée de 18 mois pour un montant de 36 millions d'euros, ont été lancées afin de traiter l'ensemble des questions relatives au projet, connu sous le nom de PANG (porte-avions

“A la fin de la décennie 2000, le contrat d'étude était toujours en attente et n'a guère avancé au début de la décennie suivante. La question du second porte-avions est donc toujours pendante.”

de nouvelle génération), qu'il s'agisse de besoins opérationnels, de caractéristiques techniques ou d'intégration de futures technologies, de prise en compte des menaces émergentes ou encore de la permanence de l'aéronaval avec le retour d'une flotte à



Photo 2 : Maquette du Système de Combat Aérien du Futur européen, dévoilée au salon du Bourget 2019

deux porte-avions. L'ensemble permettra de faire des choix architecturaux, d'établir des estimations budgétaires et de présenter au premier semestre 2020 un dossier complet au président de la République, afin que celui-ci prenne sa décision quant aux contours du futur programme.

Une étude technico-opérationnelle a été confiée à un groupe d'industriels constitué de Naval Group, Thales et MBDA (avec Dassault Aviation en sous-traitance) alors que

cains (US Navy et General Atomics) au sujet des catapultes.

Les choix technologiques dépendent de plusieurs points critiques.

Le dimensionnement

Le dimensionnement du futur porte-avions et son orientation capacitaire dépendent du type d'avions qui seront embarqués. Ce sont les Rafale Marine et des avions de surveillance aérienne (AEW) E-2D Hawkeye mais surtout, à terme, une version marine du système de combat aérien futur (SCAF). Ce programme européen, piloté par la France et l'Allemagne et auquel l'Espagne vient de se joindre, vise à développer un nouvel avion de combat (New Generation Fighter, NGF) et un système de drones avec lequel il travaillera en réseau. Une partie des engins sera mise en œuvre depuis l'avion pour former un essaim. Ces dernières caractéristiques imposent pour le NGF une dimension plus grande et un design très travaillé afin d'atteindre un niveau optimal de furtivité. Cette dernière caractéristique présente deux types de solutions, formes arrondies à l'instar du bombardier américain B-2 ou multi-facettes planes comme



© Wikipédia (Paris, U.S. Marine Corps photo by Maj. Joshua Smith)

le F-117. La maquette du NGF présentée au dernier salon du Bourget (**photo 1**) témoigne du choix de la première solution.

Dans la logique de la furtivité, l'avion doit être le plus plat possible, ce qui implique qu'il soit assez long compte tenu des capacités d'emport prévues dans ses spécifications. La maquette du Bourget avait une longueur de 18 mètres sur 14 de large soit notablement plus que le Rafale qui présente une longueur de 15,3 m et une largeur de 10,9 m. Ces dimensions laissent apparaître un autre paramètre, le poids qui lui aussi risque de subir une certaine inflation sachant que le poids du Rafale est de 24 t et celui de Hawkeye de 25 t. Le poids et l'envergure du NGF dimensionneront largement les choix et l'architecture du PANG tant du point de vue de la catapulte sur laquelle nous reviendrons, que sur les capacités d'embarquement, la place de stationnement des chasseurs étant par nature limitée.

Ces caractéristiques du NGF devraient être précisées en 2020 par les pays partenaires du projet et seront cruciales pour le dimensionnement du groupe aérien embarqué. Pour mémoire, le Charles de Gaulle pouvait

“Brest n’a plus de capacité de construction de navires neufs et c’est Saint-Nazaire, avec ses infrastructures beaucoup plus grandes, qui sera en charge de produire le ou les PANG.”

embarquer de 30 à 36 Rafale et deux Hawkeye. D'ores et déjà, il est probable que le PANG sera une plate-forme plus imposante encore que le Charles de Gaulle d'une longueur de 261 mètres et d'un déplacement en charge de 42 500 tonnes. Mais la réalisation du prochain porte-avions français sera, contrairement à celle du Charles de Gaulle, libérée des contraintes liées aux infrastructures du chantier constructeur. Le Charles de Gaulle avait dû composer avec les dimensions réduites des bassins de Brest, ce qui avait entraîné des compromis, tels que l'impossibilité d'effectuer simultanément des appontages et des catapultages et une réduction des espaces dédiés aux équipages. Depuis, la situation a changé. Brest n'a plus de capacité de construction de navires neufs et c'est Saint-Nazaire, avec ses infrastructures beaucoup plus grandes, qui sera en charge de produire le ou les PANG.

Le choix des catapultes

Pour les lancements au décollage et au freinage lors de l'atterrissage des avions, l'emploi de catapultes et de brins d'arrêt semble entériné. Mais il reste des choix cruciaux à faire compte tenu du très faible nombre d'unités à produire qui a entraîné dans le passé l'utilisation d'une technologie américaine de catapulte à vapeur. Or les Etats-Unis ont changé de technologie pour la nouvelle génération de porte-avions avec le développement de catapultes électromagnétiques EMALS. L'USS Gerald R. Ford (CVN 78) est le premier à en être doté et la mise au point de ces équipements très complexes se révèle délicate.

Le Charles de Gaulle était dès l'origine équipé de deux catapultes à vapeur du type américain C13-3, longues de 75 mètres et cela avait représenté un progrès notable par rapport aux catapultes de 50 mètres des anciens Clémenceau (1961-1997) et Foch

(1963-2000). L'objectif était alors de tenir compte de la masse plus importante du Rafale par rapport à ses prédécesseurs et aussi du fait que le Charles de Gaulle avait une vitesse maximale moindre que ses prédécesseurs.

Pour le futur porte-avions, toutes les options sont étudiées y compris le développement d'une technologie française. Mais on se heurte à une impasse car développer une technologie à vapeur n'est à l'évidence pas une solution d'avenir et développer un système électromagnétique semble difficile compte tenu des délais qu'imposerait une technologie à ses débuts. La logique et le réalisme plaident donc aujourd'hui pour un nouvel achat d'une technologie américaine. En outre il est probable que les EMALS présenteront des avantages importants pour le développement et la mise en œuvre de la version navalisée du futur avion de combat européen. En effet les efforts sont moins importants avec des catapultes électromagnétiques, car l'accélération est plus progressive ce qui évite le renforcement de nombre d'éléments des chasseurs pour un emploi naval. Cela irait également dans le sens d'une plus grande coopération entre états si, un jour, elle se renforce.

Diverses solutions concernant le nombre et la longueur des catapultes sont examinées. Une plate-forme plus longue compatible à des opérations d'appontage et de catapultage simultanés permettrait d'éviter l'un des défauts du Charles de Gaulle dont la piste avant débordait sur la piste oblique. La capacité de pouvoir mener simultanément des appontages et catapultages est un atout important puisqu'il permet de récupérer des avions de retour de mission tout en étant capable, en urgence, de mettre en œuvre des appareils de réserve pour contribuer à lancer un raid sur des navires ennemis en approche. Ainsi, le nombre et le placement

●●● des catapultes du PANG est un enjeu important. Les études envisagent la possibilité d'installer les deux catapultes principales sur le pont avant, avec une option pour l'installation d'une troisième sur la piste oblique, ce qui est la solution américaine pour leurs derniers porte-avions.

Le choix de la propulsion

Rappelons qu'après le Clémenceau et le Foch, la France a choisi une propulsion nucléaire pour le Charles de Gaulle qui est devenu le premier bâtiment de surface européen de ce type et le seul au monde à l'exception des porte-avions américains. Il est équipé de deux réacteurs nucléaires K15 qui, couplés à des turbines à vapeur

les arrêts techniques sont plus longs que pour les bâtiments traditionnels qui sont plus faciles à gérer.

Cependant la propulsion conventionnelle pose le problème de la pérennité de la ressource d'énergie pour un système devant naviguer jusqu'en 2080 et la tendance va clairement vers le remplacement progressif de ces combustibles par d'autres énergies, plus vertueuses sur le plan environnemental. Aujourd'hui, le gaz naturel liquéfié (GNL) se développe dans tous les secteurs de l'industrie maritime, des ferries et paquebots aux porte-conteneurs, en passant par les unités portuaires et demain probablement l'hydrogène. Mais il ne semble pas qu'une solution de ce type soit envisageable pour

fendre les bâtiments contre des missiles assaillants supersoniques et des missiles anti-navires balistiques, à l'image du DF-21 chinois autrement nommé «tueur de porte-avions». Des développements sont déjà en cours ou prévus en France pour faire face à ces nouvelles menaces. Un projet européen, destiné à succéder à l'Aster après 2030 et contrer les menaces aériennes et balistiques des théâtres actuels et futurs est en cours d'élaboration. Il s'agit de l'EABMDI (European Air and Ballistic Missile Defense Interceptor), pour lequel est envisagé le développement d'un missile multi-rôle à plusieurs étages offrant une capacité de protection contre les nouvelles menaces très rapides et de grande capacité de manœuvre et d'interception de cibles à très haute altitude. Ce nouveau type de missile pourrait être intégré sur le PANG, avec les systèmes associés en matière de détection lointaine et de poursuite, le tout combiné avec l'escorte et d'autres moyens terrestres, aériens et spatiaux.

“Malgré les avantages sur le plan budgétaire de la propulsion classique, le choix du nucléaire permettrait le maintien de la filière de propulsion nucléaire navale qui concerne aussi les bâtiments hautement stratégiques que sont les sous-marins nucléaires.”

La feuille de route et le coût

et deux lignes d'arbres, lui permettent de faire naviguer ses 42 500 tonnes à la vitesse maximale de 27 nœuds et de parcourir 1 000 km par jour. Chacun de ces réacteurs développe une puissance de 150 mégawatts.

L'expérience du Charles de Gaulle a montré les avantages liés au nucléaire. L'autonomie est considérable puisque son ravitaillement ne concerne plus que les approvisionnements en carburant pour l'aviation, les vivres, les rechanges et les munitions. Les manœuvres aériennes sont par ailleurs facilitées du fait que l'aérodynamique n'est pas perturbée par les échappements de fumées liés à la combustion d'un carburant fossile. Le nucléaire a ses défauts, il est plus coûteux à l'achat et à l'entretien. Comme il s'agit d'une centrale nucléaire flottante, il demande des mesures de sécurité draconiennes et il peut être endommagé en cas de combat par des missiles ou des torpilles. La conception de l'ensemble est donc très lourde. De surcroît,

le PANG compte tenu du calendrier actuel. Malgré les avantages sur le plan budgétaire de la propulsion classique, le choix du nucléaire permettrait le maintien de la filière de propulsion nucléaire navale qui concerne aussi les bâtiments hautement stratégiques que sont les sous-marins nucléaires. Le maintien de compétences critiques, chez les grands industriels et tout le réseau de PME impliquées dans la conception, la réalisation et la maintenance des réacteurs embarqués de la Marine nationale, est un facteur crucial.

Les équipements

Dans le cadre des études menées, l'armement est un point important notamment pour l'auto-défense. En plus de la protection offerte par son escorte et sa chasse embarqués, le futur porte-avions doit être solidement armé pour se défendre par lui-même. Demain, en plus des menaces que l'on connaît aujourd'hui, il faudra dé-

Une fois les études en cours achevées, un dossier sera présenté au président de la République au premier semestre 2020. Le seul impératif calendaire est de disposer d'un bâtiment opérationnel en 2038, date limite de retrait du service du Charles de Gaulle, correspondant à la dernière possibilité de rechargement de son cœur nucléaire. Sur le plan financier, selon le type de propulsion adopté, le coût du projet s'établirait entre 4 et 6 milliards d'euros pour le premier bâtiment. Il n'est pas exclu qu'un deuxième porte-avions soit envisagé et qui serait moins coûteux car les dépenses de conception et d'études seraient déjà faites. L'incertitude la plus grande réside dans le développement du SCAF car les discussions demeurent difficiles entre les partenaires pour aboutir à un projet commun, tant sur le plan opérationnel qu'industriel. Or, la taille et la masse finales du NGF seront des éléments essentiels pour le ou les futurs porte-avions français. ■

Marc Leconte

Regain d'intérêt pour les mini-centrales nucléaires (SMR)

Le lancement du projet français Nuward met en lumière le regain d'intérêt pour le nucléaire civil du concept de Small Modular Reactor (SMR). Ce projet est mené par un consortium regroupant les acteurs majeurs du nucléaire français : le CEA, EDF, Naval Group et TechnicAtome.



Photo 1 : En Russie, un prototype de centrale nucléaire flottante (Akademik Lomonosov) a été développé pour alimenter en électricité une zone isolée de la Sibérie. Cette plate-forme flottante est composée de deux modules de 35 MW. Elle a été connectée au réseau local de Pevek, dans le district de Tchoukotka, dans l'Est sibérien, le 19 décembre 2019.

© Rosatom

Le concept de Small Modular Reactor (SMR)

Le SMR est un réacteur nucléaire de puissance fortement réduite par rapport à ceux qui équipent les centrales de production d'électricité en service actuellement dans le monde. La puissance est comprise entre 10 et 300 MW, assez

proche de la puissance des générateurs équipant les sous-marins nucléaires. Ainsi le Suffren, dernier sous-marin à propulsion nucléaire lancé en fabrication pour la marine française, sera équipé d'un propulseur d'une puissance de 150 MW alors qu'une grande centrale représente environ 1 000 à 1 500 MW. Le SMR utilise les mêmes composants

que les centrales nucléaires classiques. L'uranium est utilisé comme matière fissile et l'eau comme moyen de refroidissement. Certains projets SMR sont basés sur de nouvelles matières fissiles recyclées et de nouveaux moyens de refroidissement comme les sels fondus ou l'hélium. En fonctionnement, la température du cœur varie de 100 °C à plus de 1 000°C, ●●●

- selon le fluide de refroidissement retenu, à savoir l'eau bouillante (BWR), l'eau pressurisée lourde (EPR), les sels fondus (MSR) ou l'hélium (VHTR).

Le SMR a recours au principe de sécurité passive, c'est-à-dire qu'il ne nécessite pas d'apport d'énergie extérieure. Il est par exemple inutile de prévoir des générateurs diesel pour refroidir le réacteur après son utilisation. C'est une innovation qui renforce leur sûreté. Ce type de réacteur peut être allumé ou éteint plus rapidement qu'une centrale nucléaire classique.

Le SMR est destiné à être produit en série, facile à assembler in situ, réduisant ainsi les coûts et les délais de mise en exploitation.

Marché visé

Le déploiement des SMR est envisagé pour produire principalement de l'électricité mais ce n'est pas leur seul usage. Certains types de SMR sont conçus pour produire de la vapeur ou de l'eau chaude

“Les SMR peuvent être installés au plus près des agglomérations afin de produire de l'électricité et de l'énergie distribuée par les réseaux de chaleur urbains. Dans les zones reculées, avec peu ou pas d'infrastructures, les SMR peuvent être livrés déjà assemblés, par bateau ou par la route.”

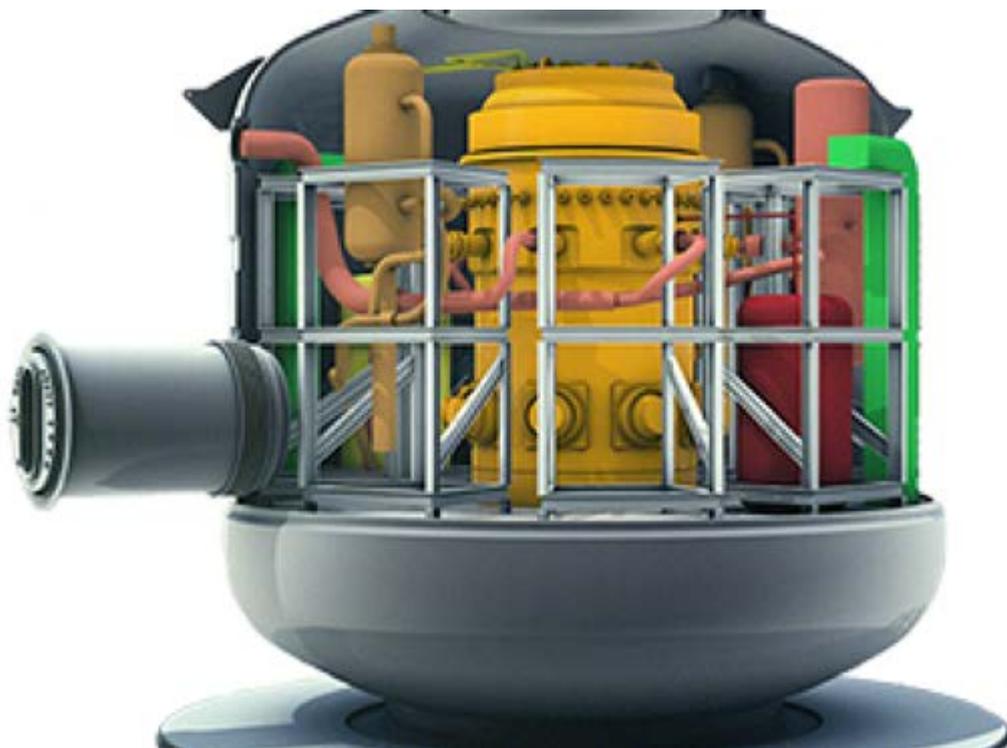
par cogénération. Ils peuvent également servir à la production d'eau potable par dessalement, sachant que la production d'eau potable est un processus très énergivore.

Les SMR peuvent être installés au plus près des agglomérations afin de produire de l'électricité et de l'énergie distribuée par les réseaux de chaleur urbains. Dans les zones reculées, avec peu ou pas d'infrastructures, les SMR peuvent être livrés déjà assemblés, par bateau ou par la route (**figure 2**).

Les types de SMR les plus innovants devraient pouvoir assurer un approvisionnement en électricité pendant cinq ans, sans que la matière fissile n'ait à être remplacée et en ne nécessitant qu'une maintenance réduite.

En France, le marché visé serait le remplacement de centrales électriques thermiques à charbon de 250 à 600 MW.

L'Agence pour l'énergie nucléaire (AEN) de l'OCDE estime que le marché des SMR pourrait représenter 20 GW à l'horizon 2040.



© TechnicAtome

Figure 1 : Le projet Nuward

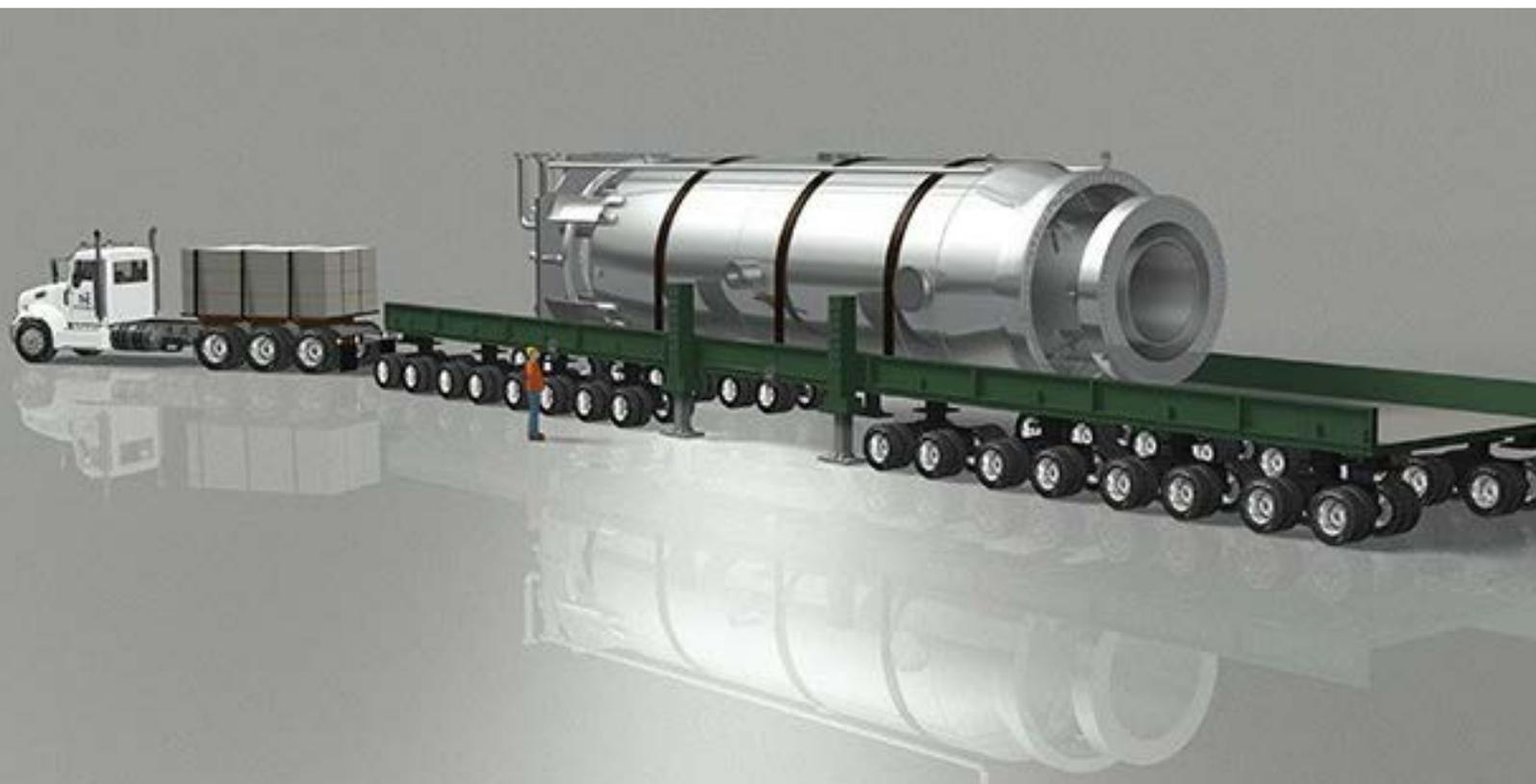


Figure 2 : Transport d'une unité SMR

“En phase d’exploitation industrielle, NuScale prévoit un coût de production de 60 \$/MWh, comparable au coût de production d’une centrale au gaz.”

Les acteurs majeurs

Sur une cinquantaine de projets de SMR identifiés par l’Agence internationale de l’énergie atomique (AIEA), la plupart sont encore au stade du développement. Seuls trois sont opérationnels : l’un en Russie (**photo 1**), les deux autres en Inde et en Chine.

Les Etats-Unis et la Russie concentrent à eux seuls les trois-quarts des projets, loin devant le Japon, la Chine et l’Europe. En Europe, il n’y a que trois projets, dont un seul en France, le projet Nuward.

L’administration américaine commence à soutenir activement une multitude de startups engagées dans des SMR, telles que la société NuScale Power. Cette compagnie a fait certifier son SMR en mai 2018 et compte mettre en service sa première centrale en 2026, dans l’Utah. Cette centrale sera composée de douze réacteurs de 60 MW, représentant au total 720 MW.

Aspect économique

Au stade actuel du développement des SMR, il est encore difficile d’évaluer les

coûts qu’il sera possible d’atteindre en phase industrielle. Toutefois les projets en cours permettent d’en estimer les valeurs possibles.

Le projet américain NuScale en Utah (**figure 3**) peut être pris en référence, car c’est l’un des projets les plus aboutis à l’heure actuelle. Ce projet devrait coûter trois milliards de dollars pour une capacité installée de 720 MW, soit environ 4 200 \$/kW.

En phase d’exploitation industrielle, NuScale prévoit un coût de production de 60\$/MWh, comparable au coût de production d’une centrale au gaz.

Les conditions du succès

Outre la compétitivité économique, le SMR exige un niveau de sécurité élevé pour trouver une place dans un mix-énergétique qui devrait être dominé par les énergies à faible émission de carbone. ●●●

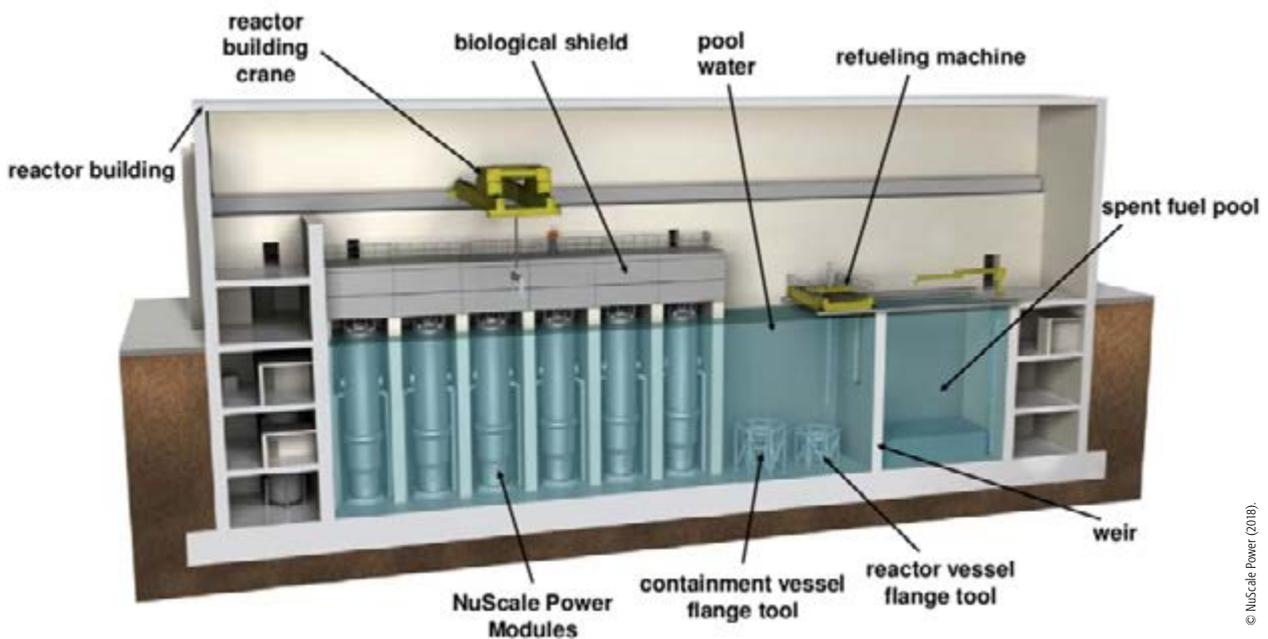


Figure 3 : Maquette du SMR de Nuscale Power intégrant 12 réacteurs de 60 MW

●●● En matière de sécurité, grâce à sa taille réduite, son autonomie en combustible, le SMR peut être enterré, voire immergé, présentant ainsi un niveau de protection élevé contre les agressions humaines et les catastrophes naturelles qui peuvent l'affecter.

ghouse Electric Company pour étudier une coopération industrielle de production et pour accélérer sa mise au point. De plus, fort d'une flotte d'environ 250 navires à propulsion nucléaire, de puissance comprise entre 50 et 350 MW, le monde maritime peut apporter une

Toutefois les centrales électriques à énergie nucléaire sont concentrées dans peu de pays. L'extension à d'autres pays suppose une adaptation aux exigences légitimes touchant la sécurité, la diminution des coûts et les délais de construction. Flexibles et autonomes, sécurisés et capables de répondre aux demandes fluctuantes en énergie, les SMR présentent des atouts pour se faire une place dans les mix électriques du futur. Ils ne sont pas destinés à remplacer les centrales nucléaires classiques qui fournissent de l'électricité bas-carbone en continu et en grande quantité, mais bien à compléter la palette des moyens de production.

Le projet français Nuward vient d'entrer dans la phase d'étude. Son design sera choisi d'ici 2025 et la présentation d'un prototype est prévue pour 2030. L'Etat français apporte un soutien financier important, de l'ordre de 50 millions d'euros. Il reste donc encore plusieurs années avant d'avoir la confirmation de sa faisabilité économique et industrielle, néanmoins les progrès à venir du SMR seront suivis très attentivement dans le monde. ■

“Flexibles et autonomes, sécurisés et capables de répondre aux demandes fluctuantes en énergie, les SMR présentent des atouts pour se faire une place dans les mix électriques du futur.”

En outre, la modularité et la compacité du SMR permettent une fabrication en usine, respectant un contrôle de qualité poussé. Ce processus devrait offrir des garanties supérieures à celles des réalisations sur site.

Pour EDF, la standardisation et la coopération internationale sont considérées comme les facteurs clés pour le développement des SMR. Le CEA et EDF ont entamé des discussions avec Westin-

expérience très précieuse pour la mise au point de nouvelles centrales de type SMR.

Perspectives

Au moment où les pays ont besoin d'énergies bas-carbone, l'énergie nucléaire constitue une solution pertinente aux côtés des énergies renouvelables comme l'hydraulique, le solaire et l'éolien.

Gérald Sanchis

Les batteries Li-ion à anodes semi-liquides

Le recours à des anodes au lithium semi-liquides pourraient permettre un meilleur contact avec un électrolyte solide et de tirer ainsi parti des avantages des batteries tout solide sans voir les performances se dégrader.

Ainsi qu'il est expliqué dans l'article d'Alain Brenac sur le prix Nobel de chimie 2019, la formation de dendrites à partir d'une anode en lithium dans les batteries Li-ion constitue un problème sérieux qui se traduit par des risques de perforation de la membrane séparatrice entre anode et cathode et partant des risques de court-circuit (**figure 1**).

Une approche consiste à remplacer l'électrolyte liquide par un électrolyte solide en utilisant des céramiques qui sont bonnes conductrices, non combustibles et mécaniquement résistantes.

Dans un tel électrolyte, les dendrites ne peuvent pas se développer ce qui offre de meilleures garanties du point de vue de la sécurité. Cependant, les performances de la batterie se trouvent alors

Le concept d'anode semi-liquide

Dans un article publié dans la revue *Joule* en juin 2019, une équipe de chercheurs de l'université Carnegie Mellon (Pittsburgh – Etats-unis), propose une autre solution. L'idée consiste à réaliser une émulsion colloïdale semi-liquide de lithium en mixant des feuilles de lithium métal, associé à du lithium bis(trifluoromethanesulfonyl)imide (LiTFSI), dans une matrice polymère de poly(éthylène-glycol) monométhyl ether (mPEG). Cette matrice a la propriété d'être double conductrice (ionique et électronique). ●●●

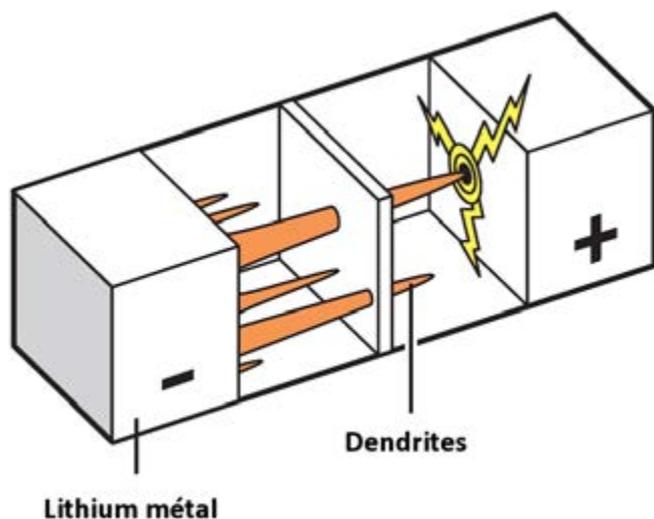


Figure 1 : Schéma de principe de formation des dendrites dans une batterie Li-ion

L'article d'Alain Brenac explique également comment le Japonais Akira Yoshino a eu l'idée d'utiliser à l'anode un matériau à base de coke de pétrole capable d'accueillir les ions Li faisant la navette entre l'anode (électrode négative) et la cathode (électrode positive). Mais revenir au lithium métal au lieu d'utiliser du graphite permettrait d'accroître fortement la capacité de la batterie.

dégradées du fait du contact insuffisant entre l'anode solide et l'électrolyte également solide.

Plusieurs solutions ont été proposées mais aucune ne semble aujourd'hui vraiment satisfaisante, en raison de la complexité des matériaux tridimensionnels envisagés ou de la température de fonctionnement auxquelles ces solutions conduisent.

“Dans un tel électrolyte, les dendrites ne peuvent pas se développer ce qui offre de meilleures garanties du point de vue de la sécurité. Cependant, les performances de la batterie se trouvent alors dégradées du fait du contact insuffisant entre l'anode solide et l'électrolyte également solide.”

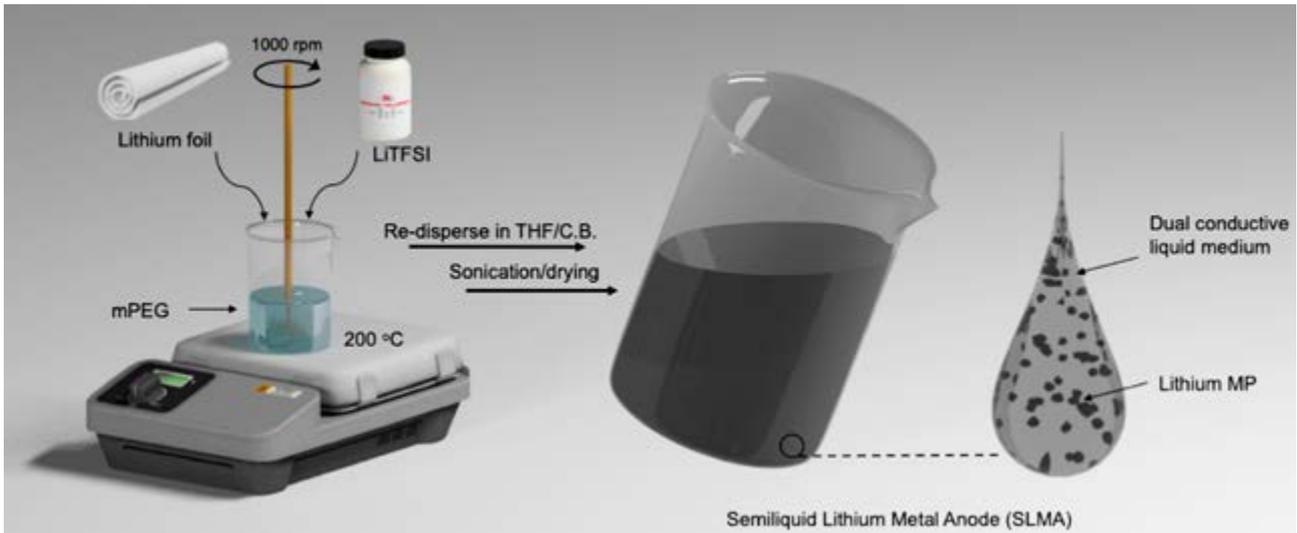


Figure 2 : Préparation de l'anode métallique semi-liquide (SLMA) – Source, Carnegie Mellon University

●●● L'ensemble est chauffé à 200°C et à cette température le mPEG réagit avec le lithium métal qui se trouve décomposé en microparticules qui se répartissent de façon homogène dans le polymère. Le LiTFSI sert à stabiliser l'émulsion qui est progressivement refroidie après cinq minutes d'agitation (figure 2) et qui servira d'anode métallique semi-liquide (SLMA). Cette anode sert à fabriquer une cellule symétrique dont la membrane séparative est constituée d'une céramique de la famille des grenats ($\text{Li}_{6.4}\text{La}_3\text{Zr}_{1.4}\text{Ta}_{0.6}\text{O}_{12}$ ou LLZTO) perméable aux ions lithium. Par rapport à une cellule

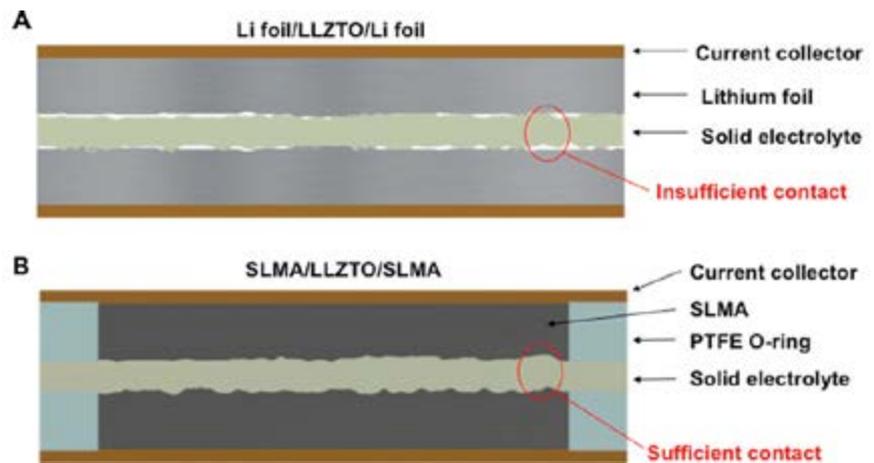


Figure 3 : Comparaison d'une cellule conventionnelle à une cellule à anode lithium semi-liquide

“L'équipe estime avoir obtenu des résultats très encourageants, en démontrant la stabilité des dépôts de lithium dans l'anode semi-liquide avec une densité de courant de 1 mA/cm² et une capacité surfacique de 1 mAh/cm².”

conventionnelle, la cellule à anode semi-liquide se distingue par un contact très amélioré entre l'électrode et l'électrolyte solide (figure 3).

Des résultats encourageants

Sur la base du montage de la figure 3, l'équipe estime avoir obtenu des résultats très encourageants, en démontrant la stabilité des dépôts de lithium dans l'anode semi-liquide avec une densité de courant de 1 mA/cm² et une capacité surfacique de 1 mAh/cm². Ces résultats s'expliquent, notamment, par la surface

d'échange très supérieure à celle d'une feuille de lithium offerte par l'émulsion colloïdale de microparticules. Elle estime que l'approche retenue est un pas en direction de batteries pour véhicules électriques pouvant atteindre 500 Wh/g de capacité.

La méthode de préparation de l'anode SLMA serait extrapolable à d'autres types de batteries (sodium métal, potassium métal) et simplifierait la fabrication des électrolytes solides en exigeant un traitement de surface moins complexe pour atteindre la qualité de contact recherchée. ■

Jean-Pierre Hauet

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

BULLETIN D'ABONNEMENT 2020



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

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)

Je consens à recevoir les autres diffusions de la SEE & de ses activités (congrès, soirées débats, revues, etc.) qui sont extérieur aux diffusions liés à mon abonnement.

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. 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
Offre valable du 01/01/2020 au 31/12/2020.

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 :



+ RAPIDE :

<https://www.see.asso.fr/ree>



Actualités quantiques

Les médias se font de plus en plus fréquemment l'écho, avec une emphase critiquable, des avancées scientifiques et techniques sur le difficile chemin de l'ordinateur quantique... Les applications quantiques sont pourtant déjà bien présentes dans nos vies, avec par exemple le laser, dont on vient de fêter le 60^e anniversaire.

La Fondation Mines-Télécom a consacré l'automne dernier son cahier annuel de prospective à « L'avantage quantique – Enjeux industriels et de formation » (disponible www.fondation-mines-telecom.org) avec l'objectif d'informer le public et les décideurs, pour comprendre les enjeux, estimer les ambitions et faire les bons choix pour l'avenir.

Quantique : le virage technologique que la France ne ratera pas

Paula Forteza, Jean-Paul Herteman, Iorsanis Kerenidis - https://forteza.fr/wp-content/uploads/2020/01/A5_Rapport-quantique-public-BD.pdf



Avec le souci de conforter les positions nationales, le gouvernement s'apprête à lancer un véritable plan quantique, à partir des recommandations du trio d'experts missionnés par le Premier ministre, qui ont été rendues publiques le 9 janvier dernier. Les 37 propositions formulées à l'intention des trois ministres concernés (Armées, Economie et finances, Enseignement supérieur, Recherche et innovation), ainsi

qu'au secrétaire d'Etat chargé du numérique, s'articulent autour de six recommandations stratégiques, propres à placer notre pays parmi les quelques-uns qui comptent dans la maîtrise des technologies avancées, notamment le calcul quantique de pointe, la cryptographie et la sécurisation des communications et les applications à des secteurs tels que la médecine moléculaire, le stockage de CO2 ou les matériaux avancés.

S'ajoutent des recommandations plus politiques, concernant la souveraineté nationale, la gouvernance ou la sécurité économique. La nécessité de créer un environnement d'innovation efficace et d'augmenter significativement l'effort budgétaire est également soulignée. Un groupe de travail est chargé d'élaborer, d'ici l'été, une feuille de route détaillée précisant le programme de travail sur cinq ans des ministères et opérateurs concernés (CEA, INRIA et CNRS).

A ces deux contributions relatives aux enjeux de la société contemporaine, s'ajoute un intense effort intellectuel pour (re) penser les fondements proprement scientifiques, philosophiques voire même anthropologiques, de cette physique quantique dont la deuxième révolution s'annonce si prometteuse. Les débats sur l'interprétation de la mécanique quantique et du processus de la mesure, constants depuis un siècle, connaissent

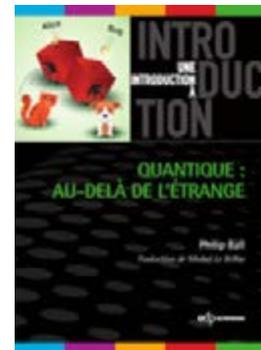
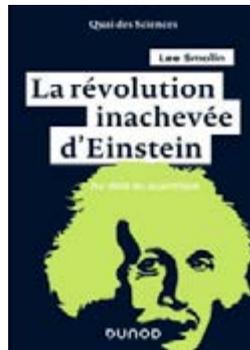
depuis peu un regain d'activité. Au consensus sur l'efficacité exceptionnelle du formalisme, s'opposent les polémiques sur les fondements ; l'interprétation de Bohr et de l'Ecole de Copenhague est de plus en plus critiquée, voire contestée. ■

La révolution inachevée d'Einstein - Au-delà du quantique

Lee Smolin - Traduit de l'anglais (Etats-Unis) par Marc Lachière Rey - Editions Dunod, Collection Quai des Sciences, septembre 2019, 310 p. - 24,90 €

Quantique : au-delà de l'étrange

Philip Ball - Traduction de Michel Le Bellac - Edpsciences, Collection « Une introduction à... », août 2019, 280 p. - 25 €



Deux ouvrages récents abordent ces thèmes ; dus à un universitaire américain et à un journaliste scientifique britannique, ils méritent d'être englobés dans un même éloge. Présentant des similitudes profondes quant à leurs intentions, soulignées par leurs titres, ils montrent la nécessité d'aller « au-delà », de dépasser les interprétations actuelles. Traduits l'un et l'autre par des spécialistes français reconnus et familiers de ces sujets, ils garantissent au lecteur de pouvoir avancer en confiance : aucune équation ne viendra lui rappeler d'éventuelles lacunes en physique théorique !

Mais qu'on ne se fasse pas d'illusion : une connaissance assurée de l'histoire et des fondements épistémologiques de la physique et une fréquentation régulière de quelques questions philosophiques ne seront pas superflues. Le fameux article fondateur d'Einstein, Podolsky et Rosen (de 1935 !) est discuté dans les deux ouvrages, mais également bien d'autres sujets, tels que la théorie de de Broglie et l'onde pilote de David Bohm, les inégalités de Bell et les expériences d'Aspect, l'originalité et l'instabilité des qbits, les multivers

chers à Everett ou Aurélien Barrau, l'intrication et la non-localité ! Lee Smolin explique en détail sa conviction einsteinienne qu'une théorie doit être réaliste et décrire une nature dont les propriétés sont indépendantes de la connaissance et de la perception que nous en avons ; Einstein pensait que la mécanique quantique n'était qu'une étape provisoire dans cette direction, d'où le titre de son ouvrage et sa structure, articulée sur les problèmes soulevés par le réalisme.

L'ouvrage de Philip Ball, remarquablement présenté comme tous ceux de la collection, présente quant à lui des thématiques plus autonomes, où les problèmes soulevés par l'émergence de l'ordinateur quantique sont abordés en même temps qu'une analyse critique des univers parallèles. Bonne lecture à tous ceux qui sont curieux de mieux comprendre les fondements de tant de promesses technologiques. ■ **BAy**

Autres publications

De l'autre côté de la Machine Voyage d'une scientifique au pays des algorithmes

Aurélie Jean - Editions de l'Observatoire/Humensis Collection « De facto » novembre 2019 208 p. - 18 €



La collection De facto accueille autour du thème de la liberté, des textes à la première personne mêlant théorie et pratique, idées et expériences, réflexion et récit : voici un ouvrage qui raconte les nombreux voyages et découvertes d'une jeune et brillante scientifique au pays des algorithmes...

Ceux-ci bouleversent déjà notre quotidien, mais ont mauvaise réputation : on leur attribue souvent la cause générique

de bien des maux, individuels ou collectifs. Mais que se passe-t-il de l'autre côté de l'iceberg mathématique ? Aurélie Jean nous explique, exemples vécus à l'appui, comment la virtualisation des phénomènes et leur modélisation permettent de progresser dans la compréhension des systèmes physiques, biologiques, économiques ou sociétaux.

Si écrire un algorithme, c'est dessiner un chemin de résolution pour un problème donné, rien ne garantit que ce soit un long chemin tranquille ; outre les compétences techniques requises, cette heuristique ne garantit pas un résultat pertinent et Aurélie Jean conte avec franchise sa découverte des biais algorithmiques ; mais elle explique qu'ils résultent des biais cognitifs du scientifique et elle démontre avec conviction la fécondité incontournable d'une démarche qui plonge dans le virtuel pour comprendre le réel. Un ouvrage passionnant aux multiples facettes qui, sans éluder les critiques et les craintes suscitées par les algorithmes, explique et rassure ; parce qu'il stimule deux qualités essentielles, la curiosité et le travail d'équipe, le voyage continue pour Aurélie Jean ! ■ **BAy**

Batteries Li-ion - Du présent au futur

Ouvrage collectif coordonné par D. Bloch, Th. Priem, S. Martinet & Ch. Ngô - Edpsciences, Collection InterSections, janvier 2020, 480 p. - 49 €



Les accumulateurs au lithium, initialement développés pour remplacer les accumulateurs au nickel-cadmium destinés à l'alimentation des appareils nomades, ont connu un essor considérable depuis le début du XXI^e siècle, grâce à l'augmentation continue de leurs performances. Couplée à la forte baisse de leur coût de production, l'utilisation des batteries au lithium à grande échelle est désormais envisagée pour accompagner l'électrification

des véhicules comme source d'énergie embarquée mais aussi comme composante essentielle des moyens de stockage stationnaire de l'énergie électrique. La percée spectaculaire de cette famille de batteries s'est traduite en 2019 par l'attribution du prix Nobel de chimie à leurs inventeurs¹.

Il manquait un ouvrage complet donnant une vue d'ensemble sur les diverses technologies existantes des batteries au lithium.

Ce gros ouvrage, qui a fait appel à l'expertise de nombreux chercheurs du CEA et du CNRS, répond à ce besoin.

Après un bref rappel historique, la moitié de l'ouvrage s'attache à décrire les variétés successives de batteries Li-ion, recensées à partir des matériaux d'électrodes ou des électrolytes utilisés. Puis viennent deux chapitres sur les méthodes de caractérisation physico-chimique et d'analyse des performances. Trois autres concernent les procédés de fabrication et les modes de gestion du système batterie. On trouve enfin des contributions relatives aux normes et à la sécurité, aux impacts environnementaux et au recyclage de ces composants.

Cette somme qui a fait intervenir pas moins de 60 spécialistes permet de répondre pratiquement aux questions techniques que l'on peut se poser sur ces composants essentiels. On peut regretter que cette juxtaposition de contributions et chapitres indépendants ne permette pas de dégager facilement une synthèse générale. Il manque également un chapitre prospectif dégageant les voies d'évolution les plus prometteuses.

Ces réserves mineures ne nous empêchent pas de recommander cet ouvrage qui est amené à devenir une référence pour les spécialistes de génie électrique. ■ **AB**

¹ John B. Goodenough, M. Stanley Whittingham et Akira Yoshino. Voir l'Actualité qui leur est consacrée dans ce numéro.



© Alexander Karamichu / Shutterstock

La technologie LED : une révolution dans le domaine de l'éclairage, mais pas seulement

La mise au point, au début des années 90, de diodes électroluminescentes (LED) utilisables pour l'éclairage a valu à une équipe de chercheurs japonais le prix Nobel 2014. Elle entraîne une révolution comparable à celle qu'avait suscitée l'arrivée des lampes à incandescence. Mais la technologie LED et OLED va plus loin et ouvre de nouveaux horizons applicatifs.

Il est impossible d'imaginer l'évolution de notre civilisation en supposant que notre espèce ne saurait produire de la lumière artificielle d'aucune sorte. L'Homme n'est pas un animal nocturne, mais, il a toujours voulu continuer à vivre normalement après la tombée de la nuit. Cependant, sa mauvaise vision nocturne et sa peur primitive de la nuit l'ont astreint aux rythmes et aux aléas des sources naturelles de lumière. Il a donc senti très rapidement un besoin impératif de faire usage de la lumière artificielle pour éclairer son environnement et il s'est très vite efforcé de compléter l'éclairage naturel par des sources artificielles. Ainsi,

le feu ou des objets chauffés émettant de la lumière ont été utilisés à des fins d'éclairage : l'éclairage artificiel est né presque simultanément avec l'humanité. La maîtrise du feu, utilisé entre autres pour éclairer, remonte de façon certaine à 450 000 ans. Au début donc, la société humaine a dû se contenter de la combustion de matériaux naturels pour produire de la lumière artificielle, mais, l'évolution des sources de lumière incandescentes s'est poursuivie, pendant des millénaires.

Au début du XIX^e siècle, l'éclairage électrique, avec l'invention de la première lampe à décharge (Davy, 1813) suivie par

la lampe à incandescence (Swan, 1860 et Edison, 1878), a profondément bouleversé la vie quotidienne. Il serait aujourd'hui inimaginable de s'en passer. Depuis ce temps, l'éclairage électrique a fait l'objet d'une évolution continue et fascinante. Dans le monde entier, les scientifiques et les ingénieurs du XX^e siècle ont créé et développé une large gamme des sources de lumière et des solutions d'éclairage adaptées répondant à tous nos besoins. Toutefois, ces évolutions avaient comme unique objectif d'augmenter l'efficacité lumineuse des systèmes afin de répondre au défi de la consommation électrique exacerbé par la crise pétrolière des années 70. ●●●

●●● A l'aube du XXI^e siècle, le monde de l'éclairage électrique est à nouveau en effervescence comme il le fut au début du XX^e siècle avec la démocratisation de la lampe à incandescence et l'avènement des lampes à décharge. Aujourd'hui, alors que l'incandescence, jugée trop énergivore, tire sa révérence, nous vivons une vraie révolution grâce à l'arrivée d'un « intrus » venant du monde du semi-conducteur : la diode électroluminescente. Contrairement aux technologies « classiques », les lampes à LED n'émettent de lumière ni à partir d'un filament chauffé comme les lampes à incandescence, ni à partir d'un plasma de décharge électrique comme les lampes fluorescentes, mais par un processus complexe ayant lieu dans un matériau semi-conducteur. Cependant, l'émission de lumière par le semi-conducteur reste un procédé qui relève de la luminescence, appelé dans ce cas précis « l'électroluminescence ».

La première émission de lumière d'un semi-conducteur a été rapportée par l'anglais Henry Joseph Round en 1907. Sans explication évidente, cette découverte fut rapidement oubliée. Il a donc fallu attendre 1962 pour que Holonyak et Bevacqua, de la société General Electric, mettent au point la première diode électroluminescente rouge, commercialisée à partir de 1968. Dans les années 1980, à l'université de Nagoya au Japon, Akasaki et Amano, mènent des recherches sur une nouvelle génération de semi-conducteurs pouvant donner naissance à une émission bleue. C'est Shuji Nakamura, un simple ingénieur qui travaillait à cette époque pour la société japonaise Nichia Chemicals, qui va mettre en œuvre les travaux de ses compatriotes pour obtenir en 1992 la première LED de puissance émettant une lumière bleue ou violette avec une bonne efficacité. Cette découverte ouvrira la voie à la technologie LED dans le domaine de l'éclairage et permettra à ces trois scientifiques de recevoir, en 2014, le prix Nobel de physique. Cette histoire fascinante de la naissance de la LED est retracée de façon magistrale par **Laurent Canale** dans son article « La LED, chemins croisés entre éclairage



L'auteur

Georges Zissis est professeur UPS au département EEA de la FSI et chercheur au laboratoire Laplace, responsable du groupe de recherche Lumière et Matière. Il a été président de la 63^e section du Conseil national des universités (2015-19) et est actuellement membre du COMEVAL (ministère de la transition écologique et solidaire). Il est président de l'IEEE Industry Applications Society (2019-20) et a reçu le 1^{er} prix de l'IEC Centenary Challenge. Il est docteur Honoris Causa de l'université de Saint-Petersbourg. Georges Zissis est membre émérite de la SEE.

“Les LED seraient-elles enfin la source de lumière idéale ?”

rage et radio télécommunications » que vous trouverez après cette introduction.

Ainsi au cours de la dernière décennie, l'éclairage à semi-conducteurs (LED, O-LED et lasers à semi-conducteurs) a défié les technologies conventionnelles. La LED, en particulier, a redistribué les cartes en laissant derrière elle les technologies « classiques », à décharge ou à incandescence en termes de performances. Par conséquent, les parts de marché des technologies classiques « fondent sous le soleil ». Les projections montrent qu'à court terme, l'ensemble de l'éclairage sera majoritairement basé sur les

« sources solides de lumières », les SSL. Si cette révolution aboutit à la conclusion prévue en remplaçant toutes les technologies existantes, cela induira un changement majeur sur le monde de l'éclairage.

D'un point de vue énergétique, selon les dernières estimations de Nations Unies, l'éclairage consomme presque 3 PWh (3 000 TWh) d'énergie électrique par an. Cette quantité représente approximativement 15 % de la production globale d'électricité mondiale. La révolution SSL permettra d'inverser la croissance de la consommation énergétique qui, selon des études récentes, risque d'être multipliée par deux d'ici 2030, si nous continuons à utiliser les technologies classiques.

La technologie LED offre un certain nombre d'avantages qui font d'elle un premier choix pour plusieurs applications : grande efficacité, longue durée de vie, bonne capacité de gradation (en utilisant cependant un gradateur bien adapté), allumage instantané, pas d'émission de chaleur, pas de rayonnements ultraviolets... Les LED seraient-elles enfin la source de lumière idéale ?

Bien qu'elles se présentent comme telles, elles restent encore perfectibles surtout en ce qui concerne la qualité de lumière. Sur le plan technologique, il reste une marge théorique considérable pour les LED au niveau de la puce puisque son efficacité peut dépasser les 100 % (par pompage thermique dans l'atmosphère). En termes d'efficacité lumineuse, les chercheurs et industriels admettent qu'un maximum de 255 lm/W sera atteint d'ici à 2025 à peu près, mais pour une densité de courant de 35 A/cm² (environ 1 W électrique dans la LED) et une température de jonction égale à 25°C. Cette dernière valeur n'est donc pas réaliste en fonctionnement. De même, se limiter à 35 A/cm² peut paraître faible alors que des LED peuvent accepter des densités de courant plus élevées pour peu qu'elles soient bien refroidies. Dans un luminaire bien conçu, on peut imaginer avoir une perte d'efficacité au niveau des LED induite par la température

et le courant de 15 à 20 %. Elle devrait se réduire encore un peu dans les années qui viennent, conduisant à une efficacité lumineuse de 200 à 220 lm/W d'ici à 2025. L'article de **Patrick Mottier** « Les diodes électroluminescentes pour l'éclairage » résume de façon très explicite les améliorations attendues au niveau du composant.

Par ailleurs, des améliorations sont à prévoir au-delà du composant lui-même. L'extraction de la lumière produite au cœur de la jonction trouve également des réponses avec l'intégration des cristaux photoniques ou des solutions innovantes avec les LED à nanofils ; la gestion thermique est également une préoccupation et les technologies Flip-Chip sont un exemple de réponse à ce genre de problématique, les boîtes quantiques ou quantum dots LED (QDLED) étant un autre exemple de développement de cette technologie. Au niveau de l'intégration, les COB (Chip on Board, puce sur un substrat métallique), avec des puces implantées directement sur un support mécanique bon conducteur thermique, constituent également une innovation en relation avec la gestion thermique. Par ailleurs, dans le même domaine, les COG (Chip on Glass, puce sur un substrat en verre) ont fait depuis peu leur apparition et ont permis la création des lampes dites « à filaments LED » en permettant une plus grande extraction de la lumière et une meilleure évacuation de la chaleur...

Les impacts potentiels des lampes sur la santé et l'environnement ont été débattus en Europe lors de la mise en place de la directive de bannissement des lampes à incandescence. Ces impacts peuvent être engendrés par certains composés chimiques utilisés dans les lampes, mais aussi par les rayonnements qu'elles émettent. Diverses études indépendantes ont montré que ces impacts sont faibles, voire négligeables, si les lampes sont utilisées de manière appropriée et recyclées à la fin de leur vie. Cependant, certaines études sérieuses ont mis en évidence une dangerosité potentielle du rayonnement bleu émis par certaines sources de lumière très brillantes émettant

une lumière blanche froide. Les LED sont plus particulièrement concernées par ce problème car certaines d'entre elles peuvent être très brillantes et émettre une lumière très froide. À forte dose, cette lumière bleue est indiscutablement dangereuse pour la rétine des yeux et pourrait influencer le développement de certaines maladies comme la dégénérescence maculaire liée à l'âge (DMLA). Par ailleurs, la lumière bleue peut perturber le rythme biologique journalier (rythme circadien). En effet, une exposition prolongée à une lumière « froide », intense pendant certaines heures du soir peut en effet avoir une incidence sur le cycle du sommeil. Ce problème n'est pas vraiment lié à la technologie LED, il s'agit en fait d'une mauvaise utilisation des sources de lumière plutôt qu'un problème technologique. L'article de **Sébastien Point**, « Lumière artificielle et santé humaine : une relation complexe », permet de voir plus clair dans ce domaine.

Bien que l'application principale des LED reste l'éclairage, elles peuvent avoir des applications tout autres. L'article d'**Urbain Niangoran** « Eclairage horticole : pourquoi choisir la technologie LED ? » traite une application émergente : l'utilisation de la technologie LED pour optimiser la croissance des plantes et contribuer ainsi à estomper le spectre de la famine dans le monde. Depuis quelques années de nombreuses études ont montré le potentiel des LEDs comme source de lumière efficace pour la croissance des plantes en milieux contrôlés. En plus de son efficacité énergétique, les avantages des LEDs résident dans la possibilité de recomposer le spectre idéal et d'ajuster l'intensité lumineuse nécessaire pour la pho-

tosynthèse, la synthèse et l'accumulation de composés phyto-chimiques au niveau des plantes. Ainsi, bien que la technologie des diodes électroluminescentes (LED) et son utilisation pour l'éclairage horticole soient récentes, les parts de marché sont conséquentes et en constante augmentation.

Le prochain défi dans le domaine des sources de lumière artificielle sera sans aucun doute le développement des sources de lumière basse consommation, économiques, durables et 100 % recyclables avec, en perspective très probable, les LED organiques qui utiliseront des matériaux biosourcés. Imaginez une feuille plastique, légère, pliable qui pourrait émettre de la lumière colorée ou bien blanche : les OLED frappent à la porte. En parallèle, dans le domaine de l'éclairage, les LED ne font pas que remplacer une technologie antérieure, elles entraînent dans leur cortège non seulement de nouveaux paradigmes mais aussi un éventail quasi-infini vers la lumière anthropo-centrée, l'interconnectivité, la communication (via le Li-Fi), et toutes applications polymorphes possibles. Ainsi, des systèmes complexes, dit « intelligents », ou mieux, « futés », feront leur entrée dans le domaine. Imaginez des systèmes d'éclairage sobres en énergie et intelligents, où les sources de lumière et les luminaires sont des objets connectés qui s'adaptent aux besoins et aux souhaits des usagers afin de leur assurer une meilleure qualité de vie... Comment ces technologies se marient et quels sont les bénéfices pour la société ? Ces aspects sont en dehors des objectifs de ce dossier mais constituent des sujets de réflexion pour l'avenir proche. ■

Les articles

La LED, chemins croisés entre éclairage et radiocommunications	p.40
Les diodes électroluminescentes pour l'éclairage	p.47
Lumière artificielle et santé humaine - Une relation complexe	p.55
Eclairage horticole : pourquoi choisir la technologie LED ?	p.62



La LED, chemins croisés entre éclairage et radiocommunications

Les LED : une histoire étonnante, qui remonte à plus d'un siècle et qui s'est développée à l'ombre des radiocommunications avant de révolutionner le monde de l'éclairage. Mais les LED n'ont pas encore dit leur dernier mot et les diodes laser nous promettent encore bien des surprises...

Introduction

L'éclairage à LED est une révolution technologique aujourd'hui passée dans nos habitudes au même titre que le réfrigérateur ou la télévision même si la vitesse à laquelle elle s'est intégrée, en moins d'une décennie, peut encore surprendre. Pourtant qui aurait pu présager, depuis la découverte de l'électroluminescence en 1907, l'essor de celle-ci ? La diode électroluminescente fait partie de ces découvertes improbables, curieuses et inattendues, fruits du hasard, au même titre que l'invention de l'aspirine, de la dynamite ou du Téflon. Mais la gestation de la LED sera longue, très longue. Plus de 50 ans pour devenir un produit grand public sous la forme d'un voyant lumineux et il

lui faudra traverser le siècle pour devenir une source de lumière à part entière. Une histoire qui commence de façon peu commune, bien loin de la lumière, avec la détection des ondes radio pour les télécommunications...

La TSF : berceau de la LED

En 1902, après de brillantes études au Royal College of Science de Londres, Joseph Round a tout juste 21 ans lorsqu'il intègre la société Marconi. Il travaille alors sur la transmission sans fil en tant qu'ingénieur et étudie plus particulièrement les propriétés du cristal de carborundum (carbure de silicium, SiC). Lorsqu'il applique des tensions comprises entre 10 et 100 V, son cristal émet des lumières

colorées jaunes-vertes, oranges ou bleues ^[1]. En 1907, il publie un article sur ses curieuses observations sans toutefois donner les bonnes explications physiques mais son observation fera date: Round prononce ainsi l'acte de naissance de l'électroluminescence, le 9 février 1907 (photo 1).

Mais cette observation est sans rapport avec son cœur de métier, les radiocommunications, et il n'y attachera pas plus d'importance. En témoigne la longueur de sa communication, pour Round et Marconi, il ne s'agit que d'une observation sans intérêt qui ne mérite pas d'être plus développée. Durant sa carrière, Joseph Round ne publiera néanmoins pas moins de 117 brevets et contribuera no-

A Note on Carborundum.

To the Editors of *Electrical World*:

SIR:—During an investigation of the unsymmetrical passage of current through a contact of carborundum and other substances a curious phenomenon was noted. On applying a potential of 10 volts between two points on a crystal of carborundum, the crystal gave out a yellowish light. Only one or two specimens could be found which gave a bright glow on such a low voltage, but with 110 volts a large number could be found to glow. In some crystals only edges gave the light and others gave instead of a yellow light green, orange or blue. In all cases tested the glow appears to come from the negative pole. A bright blue-green spark appearing at the positive pole. In a single crystal, if contact is made near the center with the negative pole, and the positive pole is put in contact at any other place, only one section of the crystal will glow and that the same section wherever the positive pole is placed.

There seems to be some connection between the above effect and the e.m.f. produced by a junction of carborundum and another conductor when heated by a direct or alternating current; but the connection may be only secondary as an obvious explanation of the e.m.f. effect is the thermoelectric one. The writer would be glad of references to any published account of an investigation of this or any allied phenomena.

New York, N. Y.

H. J. Round.



and oscillations with crystals» (détecteur de carborundum lumineux, effet de détection et oscillations avec les cristaux).

Il publiera en tout 43 articles, déposera 16 brevets dont un sur les « relais lumineux » et prophétisera que la lumière servira aux communications du futur... nos télécommunications optiques actuelles (photo 2).

De 1932 à 1941, Georges Destriau travaille pour le CNRS dans le domaine du magnétisme et de la dosimétrie à rayon X des rayonnements ionisants. En 1935, le physicien français découvre l'émission de lumière dans le sulfure de zinc (ZnS) et invente le mot « électroluminescence » pour désigner le phénomène observé [5]. En l'honneur du physicien russe, il appelle cet effet « lumière de Lossev » (ou Losev).

Photo 1 : Premier article sur l'électroluminescence ; en médaillon, Cpt H. J. Round, ingénieur chez Marconi [1].

tablement à l'effort de guerre entre 1939 et 1945 dans la détection sous-marine avec sa participation au comité ASDIC (Anti-Submarine Detection Investigation Committee) et le développement du sonar.

En 1918, à la sortie de la guerre civile russe, le nouveau gouvernement soviétique ouvre le premier laboratoire scientifique de radiocommunications à Nijni-Novgorod. Oleg Vladimirovitch Losev a 17 ans et un diplôme d'étude secondaire quand il intègre en 1920 ce laboratoire en tant que technicien. Il s'intéresse aux détecteurs à cristaux à contact ponctuel (cat whiskers) et fera les mêmes observations que J. Round avec le carborundum sans avoir connaissance de ces précédents travaux. Mais Losev s'intéresse à cette émission de lumière et fabrique un prototype de LED. En 1921, le prix Nobel est attribué à Albert Einstein pour ses recherches sur l'effet photoélectrique et ceci met en lumière ses travaux. Losev fait le lien avec ses observations et conclut que le principe de physique est identique à la nouvelle théorie quantique d'Einstein. O. Losev pose le premier les bases théoriques du principe de fonctionnement des LED. En 1927, il publie sa

découverte sur ce processus d'émission qu'il décrit comme « l'effet photo-électrique inverse » [2-4]. Lors de ses travaux, Losev va surtout jeter les bases du fonctionnement des LED très utilisées au 21^e siècle dans un article nommé « Luminous carborundum detector, detection effect

Retour aux sources de la lumière et aux radiocommunications à travers RCA (Radio Corporation of America, fondée en 1919) qui est, à l'origine, une filiale de General Electric fondée en 1892 par Edison, un des pères de l'ampoule à incandescence. ●●●

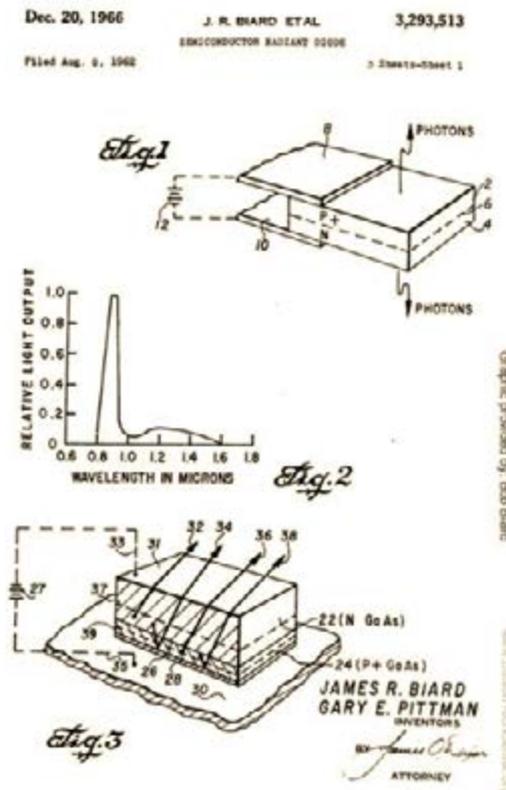


Photo 2 : Premier brevet sur les LED et mesures sur LED, en médaillon, O.V. Losev [2-4].



L'auteur

Laurent Canale est ingénieur de recherche au CNRS, laboratoire LAPLACE, équipe Lumière et Matière. Il est docteur en électronique des hautes fréquences et optoélectronique, président de l'Association française de l'éclairage Midi-Pyrénées et secrétaire de l'Industrial Light & Display Committee de l'IEEE. Ses recherches portent sur les LED et OLED. Il a dirigé deux thèses soutenues en 2017 et en dirige actuellement deux autres en cours. Il collabore également à plusieurs programmes européens. En 2019, il obtient un financement pour son programme MELINA, Mastering Efficient Lighting In North Africa.



Robert Biard



Gary Pittman

Photo 3 : A gauche le brevet de la première LED Infrarouge ; à droite, Robert Biard (en haut) et Gary Pittman (en bas), ingénieurs chez Texas Instruments [21].

●●● Titulaire d'un doctorat en physique en 1954, Rubin Braunstein intègre RCA l'année suivante et publie ses premiers résultats sur l'émission de lumière par diodes à semi-conducteurs (à base d'arséniure de gallium (GaAs), antimoniure de gallium (GaSb) ou de phosphure d'indium (InP)) [6]. Ses LED sont peu efficaces et émettent un rayonnement dans l'infrarouge. Braunstein découvre que l'énergie émise par ce rayonnement est environ égale à l'énergie de la bande interdite ($h \approx E_g$). En 1958, Rubin Braunstein et Egon Loebner déposent le brevet pour la LED verte en alliage antimoine/germanium [7]. Cependant, comme Round et Losev, Braunstein n'a jamais trouvé d'application industrielle pour sa découverte.

Les travaux de R. Braunstein servirent de base à Robert Biard et Gary Pittman. En 1959, ces derniers ont été chargés de travailler ensemble au Laboratoire de recherche et de développement sur les semi-conducteurs (SRDL) de Texas Instruments sur la création de diodes Varac-

tor AsGa pour les amplificateurs paramétriques en bande X destinés aux récepteurs radar. Ils font l'acquisition d'une caméra infrarouge japonaise et se rendent compte par hasard que toutes les diodes qu'ils fabriquent depuis des années émettent dans l'infrarouge. Ils déposent leur brevet en 1966 [8, 9] (photo 3).

Sur la base de leurs recherches, Texas Instruments a construit la SNX-100, la première LED disponible dans le commerce. La SNX-100 fonctionnait dans le spectre infrarouge et coûtait 260 dollars.

La LED devient un sujet d'étude...

Mais le passage à une application industrielle ne sera opéré qu'en 1962 par le professeur Nick Holonyak. Il obtient son baccalauréat en 1950, sa maîtrise l'année suivante et son doctorat en 1954, en génie électrique à l'Université de l'Illinois à Urbana-Champaign. N. Holonyak est le premier doctorant de John Bardeen, qui

sera une des rares personnes (avec Marie Curie, Frederick Sanger et Linus Pauling) ayant reçu deux prix Nobel, l'un pour le transistor, l'autre pour la supraconductivité (une parenthèse qu'il était difficile de ne pas mentionner). Le 1er décembre 1962, Nick Holonyak publie un article sur sa LED dans le *Journal of Applied Physics* avant d'en faire la première LED commerciale^[10,11]. C'est également la première fois que l'émission de lumière devient un vrai sujet d'études indépendant des radio-télécommunications. Cette LED est rouge, peu intense et ne peut être utilisée que pour des applications d'affichage. Une des applications majeures qui fera chuter le coût des LED rouges, et qui contribuera fortement à sa démocratisation, est la calculatrice et notamment la TI-30 de Texas Instruments, vendue à plus de 15 millions d'exemplaires (photo 4).

En 1967, M. George Craford, un ancien étudiant de Nick Holonyak, obtient son doctorat en physique et intègre l'entreprise Monsanto où, en 1972, il invente la première LED jaune par un dopage de type n (excès d'électrons) sur un système GaAsP/GaAs. Il améliore également la luminosité des LED rouges et LED rouge-orange d'un facteur dix^[12].

En 1976, Thomas P. Pearsall crée les premières LED à haute luminosité et haute efficacité pour les télécommunications par fibre optique en inventant de nouveaux matériaux semi-conducteurs spécialement adaptés aux longueurs d'ondes de transmission par fibre optique^[13].

La LED bleue, une histoire pas si simple... vers l'éclairage moderne.

Une attention particulière portée aux archives historiques révèle une histoire beaucoup plus complexe et intéressante. A la fin des années 60, la LED bleue commence à présenter un certain intérêt économique et les moyens financiers arrivent pour développer... des écrans plats! (technologie apparue en 1964 mais qui ne se démocratisera que près de 40 ans plus tard...).

Souvent considéré comme le « père de la LED bleue », Shuji Nakamura n'était pas le seul pionnier dans la technologie du nitrure de gallium.

En effet, dès 1971, Jacques Isaac Pankove publie déjà un article sur une LED bleue^[14]. De son vrai nom Jacob Isaac Yevseyevich Pancheshnikov, il est ingénieur, physicien et inventeur américain, né en Ukraine en 1922. La même année, ses parents quittent l'URSS pour s'installer en France, à Marseille, après un court séjour d'un an à Constantinople. Son père devient entrepreneur et inventeur mais, de confession juive, ils doivent quitter la France pour les USA en 1942 suite à l'occupation al-

“A l'aube du XXI^e siècle, le monde de l'éclairage électrique est à nouveau en effervescence comme il le fût au début du XX^e siècle avec la démocratisation de la lampe à incandescence et l'avènement des lampes à décharge.”

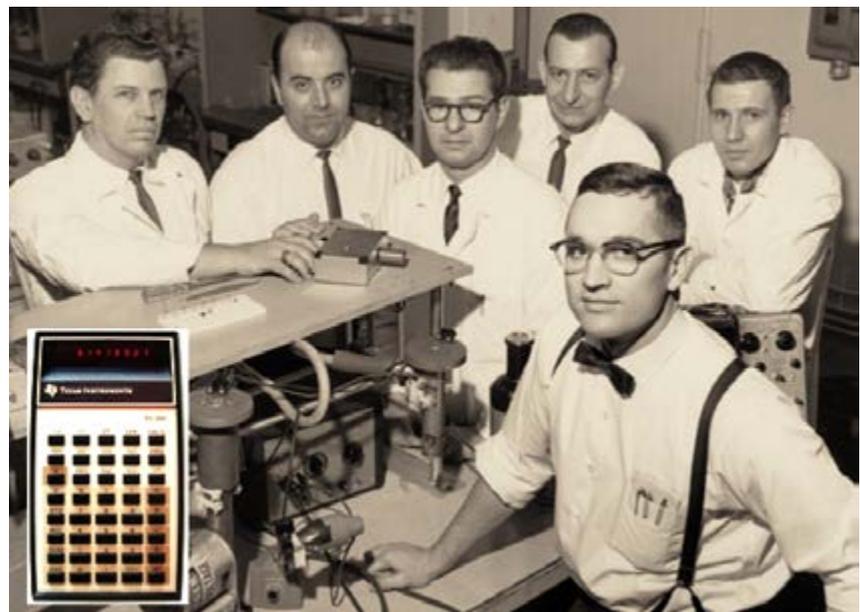


Photo 4 : De gauche à droite, Nick Holonyak en 1962 chez General Electric, à gauche, la calculatrice TI-30

lemande. Titulaire d'un master en 1948, Jacques I. Pankove travaille pour RCA comme technicien. Grâce à une bourse d'étude de RCA, il intègre un programme de doctorat à l'université de Paris et soutient sa thèse en 1960 sur « *L'émission de rayonnement infrarouge de la surface de l'Allemagne* ». Il sera l'un des pionniers de la création des premiers transistors et des LED (Cf. dépôt de brevet Photo 5).

Les principaux travaux scientifiques de J.I. Pankove sont consacrés à la physique des semi-conducteurs. Il a développé le prototype du premier transistor commer-

cial, la première LED sur l'arséniure de gallium dans le domaine infrarouge et le premier laser à injection sur le phospho-arséniure de gallium dans le visible. Il a contribué de manière significative au développement précoce de la technologie LED, notamment en 1971 avec la première LED bleue sur nitrure de gallium^[14].

Jacques Isaac Pankove n'est qu'une figure emblématique parmi beaucoup d'autres pour ne citer qu'Herbert Maruska, E. A. Miller, D. Richman, J. E. Berkeley avec lesquels il cosignera des

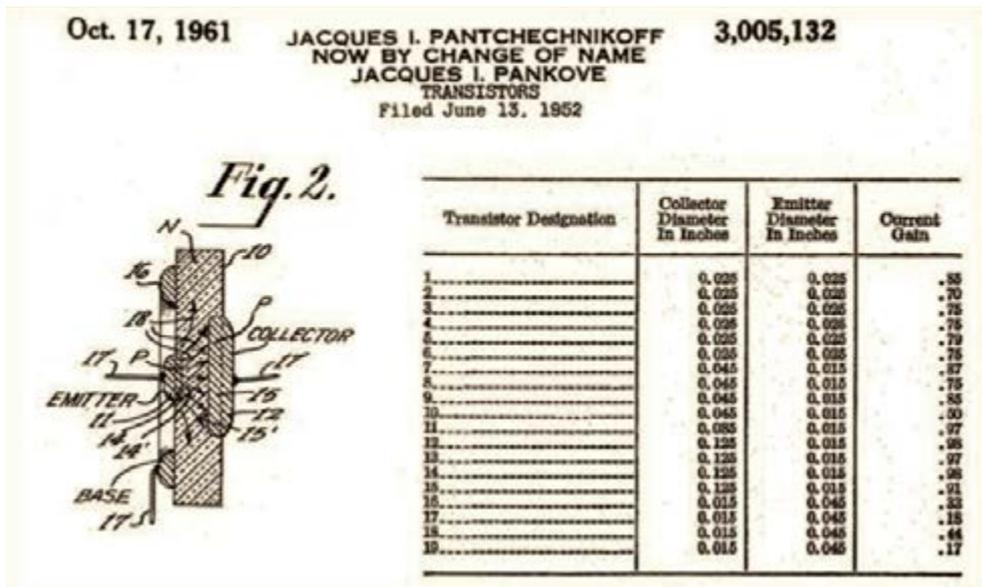


Photo 5: Brevet de transistor déposé en 1952 par Jacques I. Pankove (en médaillon), en tout, il en déposera 90.

- articles sur la LED bleue mais aussi Isamu Akasaki et Hiroshi Amano de l'université de Nagoya qui ont également joué un rôle crucial [15, 16].

Shuji Nakamura est né le 22 mai 1954 à Ehime, au Japon. Il obtient son master en génie électrique à l'université de Tokushima en 1979. Il n'a qu'un pont à franchir pour intégrer aussitôt l'entreprise Nichia Chemical Industries qui se situe à moins d'une heure de marche. En 1988, il passe un an à l'université de Gainesville en Floride aux États-Unis, en qualité d'assistant de recherche invité. En 1989, il commence la recherche sur les LED bleues. Parallèlement, il obtient son diplôme de doctorat de l'université de Tokushima en 1994 et, entre 1993 et 1995, il développe les premières LED bleues/vertes à base de nitrure [17] puis les premières diodes laser violettes en 1995. Depuis 2000,



Photo 6: Les lauréats du Prix Nobel de Physique 2014. De gauche à droite : Isamu Akasaki, Hiroshi Amano et Shuji Nakamura

il est professeur au département des matériaux de l'université de Californie à Santa Barbara aux États-Unis, détient plus de 300 brevets et a publié plus de 400 articles.

La principale contribution de Shuji Nakamura à la technologie du nitrure de gallium réside dans la mise au point d'un procédé de fabrication en grande série basé sur des techniques de laboratoire développées par H. Maruska et I. Akasaki.

“La principale contribution de Shuji Nakamura à la technologie du nitrure de gallium réside dans la mise au point d'un procédé de fabrication en grande série basé sur des techniques de laboratoire développées par H. Maruska et I. Akasaki.”

Les rôles joués par S. Nakamura dans le développement de cristaux de nitrure de gallium et la fabrication de LED bleues et blanches sont inextricablement liés : les améliorations apportées aux cristaux de nitrure de gallium ont entraîné une augmentation de l'émission de lumière et de l'efficacité [18]. De plus, S. Nakamu-

ra a créé presque à lui seul des cristaux de nitrure de gallium et la technologie de la LED bleue chez Nichia Chemical Industries, une entreprise chimique de taille moyenne basée au Japon. Dans son récit, Johnstone mentionne que «*Nakamura a dû surmonter toutes les difficultés en innovant dans les cristaux de nitrure de gallium et les LED bleues, y compris de nombreux obstacles venant de la direction de son entreprise elle-même*»^[19].

Si, en 2014, I. Akasaki, H. Amano et S. Nakamura ont été honorés du prestigieux prix Nobel de physique (**Photo 6**), ce n'est pas simplement pour la couleur du rayonnement émis par leur LED. Ils ont été récompensés pour avoir inventé la diode électroluminescente bleue (LED) émettant avec une efficacité suffisante pour pouvoir ouvrir la voie aux LED blanches et à l'éclairage.

Et demain ?...

Aujourd'hui, les records en terme d'efficacité lumineuse au niveau de la puce sont de 303 lm/W (à comparer avec celle d'une lampe à incandescence qui est de l'ordre de 18 lm/W) avec des efficacités « système » (c'est à dire incluant l'électronique) de l'ordre de 130 lm/W. Mais alors que sur le plan théorique une lampe à incandescence ne peut dépasser une efficacité énergétique de l'ordre de 20 % (le reste étant perdu sous forme d'infrarouge), il a été démontré qu'une source de lumière à LED peut atteindre une efficacité de 110 % ! Les 10 % dépassant (déjà !) la perfection résultant du pompage thermique ambiant... Avec un rayonnement entièrement contenu dans le domaine du visible (pas d'émission infrarouge ni d'ultra-violet), il reste donc encore une belle marge de progression... Le développement de la technologie des LED suit une loi analogue à la loi de Moore associée au développement de la puissance de calcul informatique. Cette loi est appelée loi de Haitz, du nom de Roland Haitz d'Agilent Technologies, qui prévoit que les performances



Remise du titre de Docteur Honoris Causa de l'Université de Toulouse à Shuji Nakamura en 2019.

“Le développement de la technologie des LED suit une loi analogue à la loi de Moore associée au développement de la puissance de calcul informatique.”

des LED doubleront tous les trois ans, pour des prix divisés par 10 tous les dix ans^[20].

L'avenir de l'éclairage LED passera sans doute par le laser bleu. Cette technologie, déjà intégrée dans certains phares de voiture (pour l'instant dans certains modèles de véhicule haut-de-gamme), devrait remplacer les LED pour devenir la source de lumière de la prochaine génération. En effet, les LED classiques présentent une limite physique : en augmentant la puissance d'entrée, les LED deviennent très lumineuses mais avec cette même augmentation de la puissance, les effets thermiques apparaissent et le rendement diminue progressivement alors que celle des LED laser peut être augmentée indéfiniment en conservant un rendement élevé. Le potentiel des LED laser ne s'arrête pas simplement à l'éclairage mais perce également dans tous les domaines technologiques : de l'affichage au rétro-éclairage, des communications par fibre optique aux télécommunications sans fil.

Les diodes laser pourraient en particulier renforcer les communications sans fil Li-Fi et permettre des débits de transmission de 3,5 Gbit/s ou plus. « *La vitesse de modulation de l'éclairage laser est beaucoup plus rapide que celle des LED presque 1 000 fois plus rapide, de sorte que la vitesse d'Internet deviendrait beaucoup, beaucoup plus rapide* » a projeté S. Nakamura.

L'innovation naîtra également aux confluent des espaces scientifiques. La rencontre de la photonique et des micro-ondes réservent un avenir prometteur dans les télécommunications (5G) ou les véhicules sans chauffeur (technologies radar)...

Chemins croisés entre éclairage et télécommunications : l'histoire de l'éclairage à LED naît dans le berceau des télécommunications et, avec le Li-Fi, retourne aux télécommunications... ■

Laurent Canale

Dr - Ingénieur de Recherche au CNRS
Laboratoire LAPLACE, équipe Lumière
et Matière

Résumé

Il est naturel de penser que l'évolution des technologies soit le fruit du travail dans le domaine scientifique auquel on porte intérêt. Qui pourrait penser que des liens intimes existent entre ces deux univers aussi éloignés que l'histoire de l'éclairage et celle des radio-télécommunications ? Si l'acronyme « LED » est aujourd'hui synonyme d'« ampoule », elle reste avant tout une diode issue de la recherche en télédétection. D'abord « infrarouge », puis « rouge », sa lumière blanche intègre aujourd'hui notre quotidien et prolonge nos journées. Il y a près d'un siècle, Joseph Round déclarait officiellement son acte de naissance dans le monde de la lumière, ensuite, Oleg Losev le comprendra et en fera un sujet d'étude à part entière et enfin Georges Destriau donnera un nom à sa lumière : « électroluminescence ».

Une surprenante histoire pour cette source de lumière qui révolutionne aujourd'hui notre quotidien et qui était pourtant restée durant des décennies un enfant ignoré et déconsidéré, voire un sujet sans intérêt, caché dans l'ombre des radio-télécommunications... ■



Abstract

It is natural to think that the evolution of technologies is the fruit of work in the scientific field in which researchers are interested. Who would think that intimate links exist between these two universes as distant as the history of lighting and that of radio-telecommunications? If the acronym « LED » is today a synonym of « light bulb », above all it remains a diode from teledetection research. First « Infra-Red », then « red », today its white light integrates our daily life and extends our days. A century ago, Joseph Round was officially declaring its birth certificate in the world of light, after Oleg Losev will understand it and make it a subject of study in his own right, and then, Georges Destriau will name its light: « electroluminescence ». A surprising story for this light source that revolutionizes our daily lives today and which had nevertheless remained for decades an ignored and discredited child, even an irrelevant subject, hidden in the shadow of radio telecommunications... ■

Bibliographie

- [1] Round, Henry J. (9 February 1907). « A note on carborundum ». *Electrical World*. 49 (6): 309.
- [2] Losev O.V. Optical Relay. Patent No. 12 191, February 2, 1927
- [3] Losev, Oleg, « Детектор – Генератор ; Детектор - Усилитель » (Detector – Generator ; Detector - Amplifier), *Telegrafia i Telefonija bez Provodov*, Vol.14 (1922) pp. 374-386.
- [4] Losev, O. V. (1927). "Luminous carborundum detector and detection with crystals (*Wireless Telegraphy and Telephony*). 5 (44): 485–494. English version published as Lossev, O. V. (November 1928). « Luminous carborundum detector and detection effect and oscillations with crystals ». *The London, Edinburgh, and Dublin Philosophical Magazine and Journal of Science*, 6:39, 1024-1044, DOI: 10.1080/14786441108564683
- [5] Georges Destriau, « Recherches sur les scintillations des sulfures de zinc aux rayons », *Journal de Chimie Physique*, v. 33 (1936), 587-625.
- [6] Braunstein R. Radiative transitions in semiconductors. *Physical Review*. 1955, 99(6):1892-1893. DOI: 10.1103/PhysRev.99.1892
- [7] Braunstein R., Loebner EE. Semiconductor device for generating modulated radiation. RCA Corp, assignee, U.S. Patent 3102201. Issued : Aug. 27th, 1963
- [8] Biard JR, Bonin EL, Carr WN, Pittman GE. GaAs infrared source. *International Electron Devices Meeting*, Washington, D.C. Oct. 1962, Vol. 8, pp 96.
- [9] Biard JR, Pittman GE. Semiconductor radiant diode. U.S. Patent 3293513. Issued: Dec 20th, 1966
- [10] Holonyak, Nick, Jr. ; Bevacqua, S. F. *Applied Physics Letters*, Volume 1, Issue 4, p.82-83 (1962)
- [11] Holonyak Nick; Bevacqua, S. F. (December 1962). « Coherent (Visible) Light Emission from Ga(As_{1-x}P_x) Junctions ». *Applied Physics Letters*. 1 (4): 82. doi:10.1063/1.1753706.
- [12] Craford M.G., Shaw R.W., Herzog A.H., and Groves W.O. « Radiative recombination mechanisms in GaAsP diodes with and without nitrogen doping » *J. Appl. Phys.* 43, 4075 (1972)
- [13] Pearsall, T. P.; Miller, B. I.; Capik, R. J.; Bachmann, K. J. (1976). « Efficient, Lattice-matched, Double Heterostructure LEDs at 1.1 mm from GaIn_{1-x}As_yP_{1-y} by Liquid-phase Epitaxy ». *Appl. Phys. Lett.* 28 (9): 499. doi:10.1063/1.88831
- [14] J.J. Pankove, E.A. Miller, J.E. Berkeyheiser, « GaN blue light-emitting diodes », *Journal of Luminescence*, Volume 5, Issue 1, 1972, Pages 84-86, ISSN 0022-2313, https://doi.org/10.1016/0022-2313(72)90038-5.
- [15] Maruska H.P., Rhines W.C., Stevenson D.A. « Preparation of Mg-doped GaN diodes exhibiting violet electroluminescence » *Mat. Res. Bull.* 7, 777 (1972)
- [16] Light emitting semiconductor device using nitrogen-Group III compound ; Patent number: 5905276, assigned: Isamu Akasaki, Hiroshi Amano, Toyoda Gosei Co., Ltd. ; Inventors: Katsuhide Manabe, Masahiro Kotaki, Hisaki Kato, Michinari Sassa, Isamu Akasaki, Hiroshi Amano ; Filed: November 6, 1997 ; Date of Patent: May 18, 1999.
- [17] Nakamura S., Senoh M., and Mukai T. « P-GaN/n-GaN double-heterostructure blue-light-emitting diodes » *Jpn. J. Appl. Phys.* 32, L8 (1993a)
- [18] *The Logics of Materials Innovation: The Case of Gallium Nitride and Blue Light Emitting Diodes*, Christophe Lécuyer and Takahiro Ueyama, *Historical Studies in the Natural Sciences*, Vol. 43, No. 3 (Jun., 2013), pp. 243-280, Published by: University of California Press, DOI: 10.1525/hsns.2013.43.3.243
- [19] Bob Johnstone, *Brilliant! Shuji Nakamura and the Revolution of Solid State Lighting* (Amherst, MA: Prometheus Books, 2007).
- [20] « Haitz's law », *Nature Photonics*, vol. 1, no 1, 2007, p. 23 DOI: 10.1038/nphoton.2006.78



Les diodes électroluminescentes pour l'éclairage

Pendant longtemps l'application des LED s'est trouvée cantonnée à la signalisation et à l'affichage. C'est l'arrivée des LED bleues qui a permis de réaliser des LED blanches en les associant à des luminophores, convertisseurs de longueur d'onde. Les LED blanches s'imposent aujourd'hui dans le domaine de l'éclairage avec une efficacité lumineuse de plus de dix fois supérieure à celle des lampes à incandescence.

L'émergence des diodes électroluminescentes (LED) dans l'éclairage

Comme l'a montré Laurent Canale dans l'article précédent, les diodes électroluminescentes (ou LED¹) sont devenues, depuis de nombreuses années, des composants standard de l'électronique. En revanche, ce n'est que plus récemment qu'elles ont pénétré le monde de l'éclairage. Contrairement à la signalisation ou à l'affichage lumineux qui font principalement appel à de la lumière de couleur,

l'éclairage, dans sa fonction première, requiert essentiellement de la lumière blanche. Et si les LED de couleur rouge, orange, verte sont apparues progressivement sur le marché depuis la fin des années 60, il a fallu attendre les années 90 pour que des LED bleues arrivent enfin sur le marché. Et sans bleu, pas de blanc, donc pas d'éclairage ! Par ailleurs, l'efficacité lumineuse des LED était bien trop faible pour détrôner les technologies en place, que ce soit les lampes à incandescence ou fluorescentes.

Deux facteurs déclenchants ont été à l'origine de l'émergence de l'éclairage à LED.

Le premier, bien sûr, l'invention des LED bleues qui donnaient, théoriquement du moins, accès à la lumière blanche. Le deuxième a été un article à l'origine d'une feuille de route ambitieuse (**figure 1**) rapidement cooptée par les universitaires et industriels du domaine [1]. On peut le considérer comme l'article fondateur de l'éclairage à LED.

Ses auteurs, issus de Hewlett-Packard et des Sandia National Laboratories, écrivaient en substance : « *Des changements spectaculaires se produisent dans la technologie de l'éclairage. Les diodes électroluminescentes, utilisées jusqu'à ré-*

¹ LED pour Light Emitting Diode.



L'auteur

Patrick Mottier est retraité du CEA-LETI depuis janvier 2017. Auparavant, il a été en charge de projets dans différents domaines de l'optoélectronique. De 2005 à 2015, il a été à l'origine des projets de recherche-développement du CEA dans le domaine des LED, visant notamment les applications de cette technologie à l'éclairage. Ces travaux ont notamment abouti à la création de la société Alédia¹. Actuellement, il apporte son expertise en matière de LED au cluster Lumière².

¹ <https://www.aledia.com/>

² <https://www.clusterlumiere.com/>

nement principalement comme simples voyants, deviennent aussi brillantes et efficaces que les ampoules à incandescence. Elles ont déjà commencé à remplacer ces dernières dans de nombreuses applications, en particulier dans celles qui nécessitent fiabilité, compacité, fonction-

aussitôt adoptée. Elle expliquait de manière argumentée comment, moyennant des efforts de R&D ciblés et le financement ad hoc, on pouvait atteindre les 200 lm/W et l'impact positif que cela aurait sur la consommation énergétique induite par les besoins en éclairage.

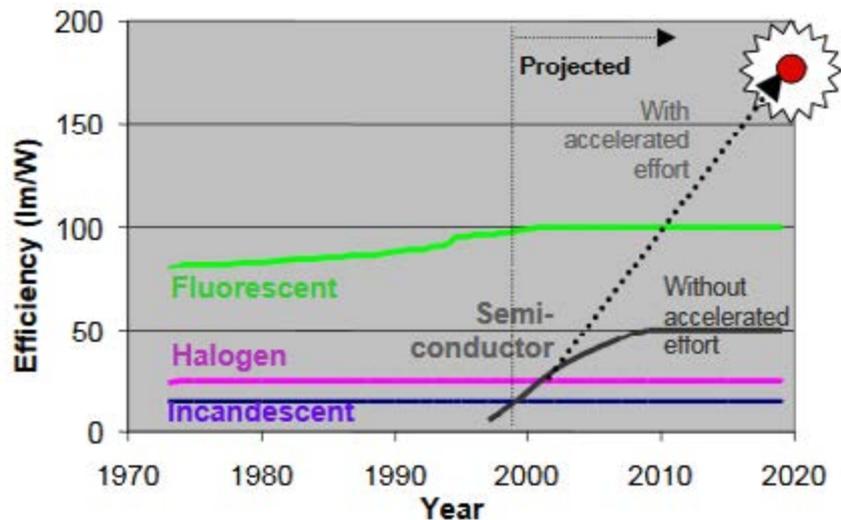


Figure 1 : Première présentation de la feuille de route affichant le potentiel des technologies LED comparées aux technologies d'éclairage traditionnelles [Juillet 2000].^[1]

- nement à basse température et/ou directionnalité...

On pense que d'autres améliorations majeures de cette technologie sont réalisables. Récemment, un rendement de conversion électrique-optique supérieurs à 50 % a été atteint dans le domaine infrarouge. Si des rendements similaires sont obtenus dans le visible, le résultat serait le Graal de l'éclairage, à savoir : une source de lumière blanche présentant une efficacité lumineuse de 200 lm/W², soit deux fois plus efficace que les lampes fluorescentes et plus de dix fois plus efficace que les lampes à incandescence ».

Cette profession de foi a été présentée pour la première fois le 6 octobre 1999 au forum annuel de l'OIDA (Optoelectronics Industry Development Association) qui l'a

Depuis, cette feuille de route a été précisée et enrichie régulièrement lors de workshops annuels... Et a été suivie par les industriels leaders du domaine (figure 2). Les objectifs visés en termes d'efficacité lumineuse sont désormais de 255 lm/W à l'horizon 2025 pour des LED blanches basées sur des LED bleues combinées à des luminophores³. A plus long terme, une efficacité lumineuse de 325 lm/W semble atteignable pour des LED blanches basées sur la combinaison de LED de couleur⁴ [2]. Ces valeurs sont toutefois estimées pour une température de jonction de 25°C et une densité de courant de 35 A/cm². A titre de comparaison, les lampes à incandescence affichent une efficacité lumineuse typique de 13 lm/W.

² L'efficacité lumineuse s'exprime en lumen/Watt, abrégé en lm/W, elle intègre la sensibilité de l'œil humain à la longueur d'onde du rayonnement.

³ PC-LED pour Phosphor-Converted LED en anglais. Phosphor ici doit se traduire par luminophore et non par phosphore. Il n'y a pas trace de phosphore dans les luminophores.

⁴ CM-LED pour Color-Mixed LED

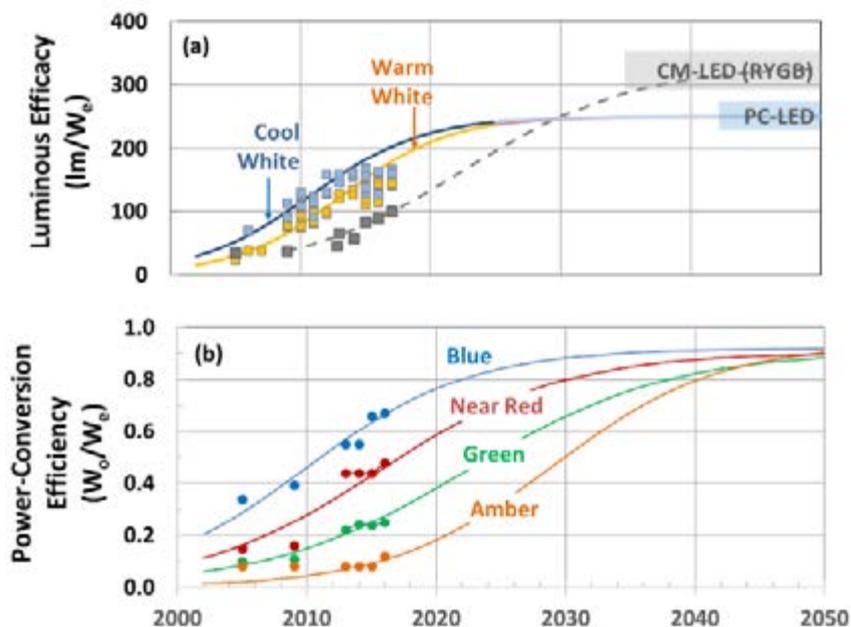


Figure 2 : Version 2018 de la feuille de route. Les carrés et les points figurent les caractéristiques des produits commerciaux leaders. A noter, qu'elle considère désormais également le potentiel des sources blanches réalisées par combinaison de quatre couleurs (rouge, vert, bleu, orange) [2].

Dans cet article, nous nous intéresserons à la première approche basée sur des LED bleues à luminophores.

Les LED blanches

Les LED blanches actuellement sur le marché sont basées essentiellement sur des LED bleues⁵ dont une partie de la lumière émise est adsorbée par des luminophores et réémise à des longueurs d'onde plus grandes. Le mélange de la lumière bleue subsistant après la traversée des luminophores et de la lumière réémise par ces derniers produit une lumière blanche, c'est-à-dire à large spectre. Ses caractéristiques dépendent des luminophores utilisés et de leur épaisseur (figure 3).

Les caractéristiques des LED ainsi obtenues, notamment leur efficacité lumineuse, dépendent de nombreux paramètres : rendement de conversion de la LED bleue, rendement de conversion des luminophores, efficacité lumineuse du spectre lumineux (figure 4), etc. Tous ces paramètres ont fait et font encore l'objet de travaux de R&D afin

d'être maximisés. L'amélioration continue des designs et la maîtrise technologique ont régulièrement amélioré les caractéristiques lumineuses des LED, et par contre-coup celles des lampes à LED.

Parmi ces paramètres, l'efficacité lumineuse du spectre est peut-être la plus difficile à appréhender. On peut raisonner sur un exemple : l'œil humain étant bien plus sensible dans le vert que dans le bleu ou le rouge, à puissance optique rayonnée identique, une lumière concentrée dans la zone

verte du spectre serait bien plus efficace qu'une lumière rouge ou bleue. Il va sans dire que la qualité d'éclairage s'en ressentirait ! D'emblée apparaît la nécessité de compromis entre efficacité lumineuse du spectre et qualité d'éclairage (en termes de perception des couleurs).

La LED bleue

Les LED bleues sont basées sur le nitrure de gallium (GaN) allié en faibles proportions au nitrure d'indium (InGaN), un semi-conducteur dont la bande interdite correspond à une émission dans le domaine visible. La longueur d'onde du pic d'émission dépend du taux d'indium et, en principe, peut couvrir sur tout le domaine visible. Dans la pratique, les performances des LED se détériorent lorsque le taux d'indium est trop élevé et cette technologie ne présente actuellement de bonnes performances que pour les LED bleues.

Afin d'améliorer le rendement de conversion entre la puissance électrique injectée et la puissance lumineuse sortant de la LED, de nombreux travaux ont été menés qui ont abouti à des structures assez complexes basées sur des multi-puits quantiques qui ont rapidement remplacé les jonctions p-n simples. Ces derniers sont constitués d'un empilement alternatif de couches extrêmement fines (quelques nanomètres) d'InGaN de différentes compositions (figure 5). Ils permettent d'augmenter la probabilité d'inte- ●●●

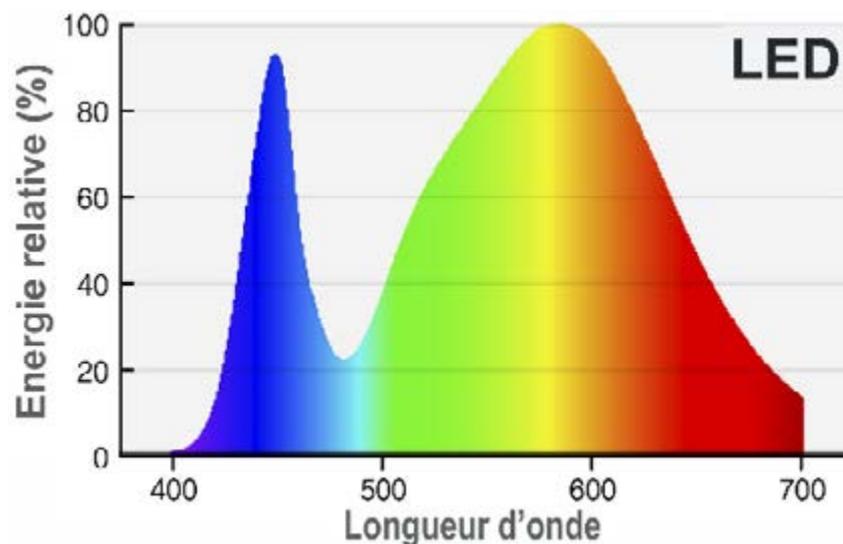


Figure 3 : Exemple de spectre de LED - LUXEON M, LXR7-SW40 – Source : Wikipédia.

⁵ On notera comme exception, la société américaine SORAA dont les LED, basées sur une technologie GaN on GaN™ propriétaire, émettent dans le violet.

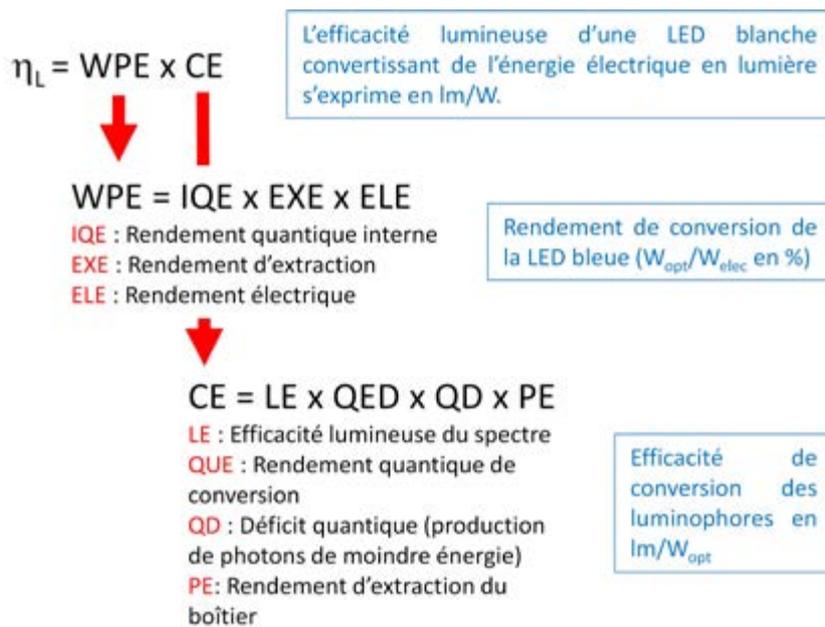


Figure 4 : Les différentes contributions à l'efficacité lumineuse d'une LED blanche, d'après^[3]

- réaction radiative entre électrons et trous dans la jonction semi-conductrice.

Même si elles ne sont généralement pas fabriquées sur des substrats de silicium comme le sont les transistors, et plus généralement la quasi-totalité des composants de l'électronique, la fabrication des LED fait appel aux mêmes techniques : substrat cristallin, croissance de couches épitaxiées, dépôts, photolithographie, gravure... Le saphir est le substrat le plus couramment utilisé, on notera toutefois parmi les leaders, l'exception de CREE qui continue à fabriquer ses LED sur du carbure de silicium cristallin (SiC). Le saphir, comme le carbure de silicium, ne jouent ici qu'un rôle mécanique dans le sens où ils ne sont que le support d'une couche de nitrure de gallium épitaxiée⁶ sur laquelle vont être installées les différentes couches et réalisées les opérations diverses requises pour la fabrication des LED.

De la lumière bleue à la lumière blanche

La conversion de la lumière bleue produite par la LED en lumière blanche

⁶ L'épitaxie est une méthode de dépôt qui permet au matériau déposé de retrouver sa structure cristalline et les propriétés qui l'accompagnent.

se fait grâce à des luminophores. Ces derniers vont adsorber une partie des photons bleus pour réémettre des photons de moindre énergie avec un spectre d'émission plus large que celui des LED.

Les premières LED blanches utilisaient un grenat d'yttrium et d'aluminium dopé au cérium (YAG:Ce). Le spectre d'émission du YAG:Ce est centré dans le jaune, ce qui rendait les premières LED « blanches » pauvres en rouge et donc d'un blanc parti-

culièrement froid et d'un rendu de couleur désastreux. Par ailleurs, les proportions de bleu et de jaune dépendant de l'épaisseur de luminophores traversée, les caractéristiques de la lumière blanche émise dépendaient de la direction d'émission.

La technique a cependant rapidement évolué. On a vu émerger de nouveaux luminophores, qui, mélangés, permettent d'enrichir la qualité spectrale de la lumière produite. Les techniques de mise en œuvre des luminophores sur la LED ont également cherché à améliorer l'homogénéité spectrale de la lumière produite quel que soit l'angle sous lequel on la regarde.

L'efficacité lumineuse d'une LED n'est pas constante

L'efficacité lumineuse des LED n'est pas constante et deux paramètres jouent particulièrement sur celle-ci, à savoir : la densité de courant traversant la LED et la température de la jonction semi-conductrice. On pourrait y ajouter la durée d'utilisation du composant qui, petit-à-petit, dégrade ses caractéristiques.

L'efficacité lumineuse maximum est atteinte pour de faibles densités de courant, donc pour de faibles flux de lumière. Si l'on veut atteindre des flux importants, il faut accepter une perte d'efficacité, une caractéris-

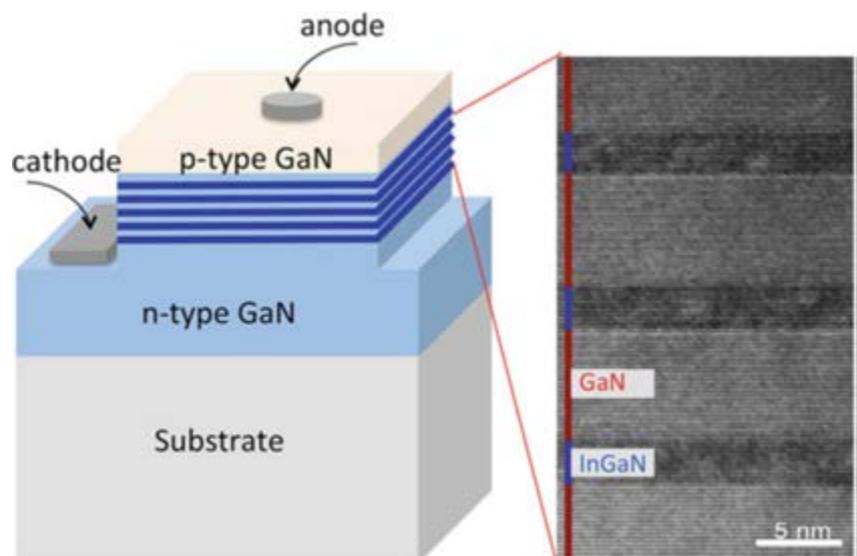


Figure 5 : Structure typique d'une LED bleue avec, à droite, une photographie au microscope électronique montrant les différentes couches constituant le multi-puits quantique. Source : [4] page 91.

tique propre aux LED que l'on ne retrouve pas avec les autres sources de lumière (**figure 6**). De même, lorsque la température de jonction s'élève, l'efficacité chute également. L'utilisation de courant élevé chauffant la jonction de la LED, les deux effets se cumulent pour faire chuter l'efficacité des LED de forte puissance.

Afin de pouvoir comparer les performances des LED en termes d'efficacité lumineuse, il a fallu définir à quelle densité de courant et à quelle température les mesures devaient être faites. Au départ, les caractéristiques fournies par les fabricants étaient données de manière standardisée à une densité de courant de 35 A/cm² (correspondant à environ 1 W électrique par mm² de jonction) et une température de jonction de 25 °C. Cette dernière ne peut être mesurée qu'en laboratoire avec un équipement spécifique. En effet, dans une utilisation courante la température de la jonction s'élève dès la mise en service de la LED et peut atteindre la centaine de degrés, voire plus (ou beaucoup plus pour les mauvais produits!). Actuellement, la plupart des fabricants donnent leurs caractéristiques à une température de jonction de 85 °C plus représentative de situations réelles. La température maximum d'utilisation recommandée pour ne pas trop impacter la durée de vie est d'environ 100 °C à 150 °C.

Le packaging ⁷ des composants

La température de jonction de la LED impacte directement les caractéristiques de la LED et donc celles de la lumière produite. On a vu en effet que le rendement de conversion de la LED bleue diminue. Mais la longueur d'onde de son pic d'émission évolue également ce qui peut se traduire par une évolution de l'efficacité d'excitation des luminophores. La durée de vie de la jonction, comme celle des luminophores, diminue également lorsque la température d'utilisation augmente. On a donc tout intérêt à garder les LED les plus froides possibles. Lors du montage en boîtier des LED,

⁷ Opération de montage en boîtier de la puce semi-conductrice.

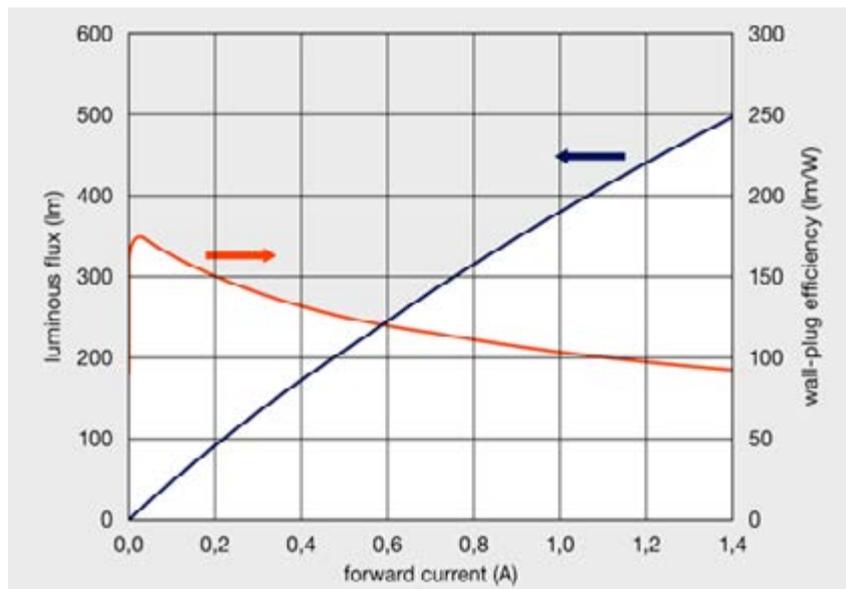


Figure 6 : Evolution de l'efficacité lumineuse et du flux lumineux des LED sur GaN avec le courant
Source : Osram Opto Semiconductors.

“La température maximum d'utilisation recommandée pour ne pas trop impacter la durée de vie est d'environ 100 °C à 150 °C.”

notamment des LED de puissance, chasse est faite à toute source de résistance thermique, afin de dissiper au mieux la puissance thermique résiduelle ⁸.

Selon les applications visées, on pourra privilégier certains paramètres à d'autres parce qu'ils permettront d'obtenir de meilleures performances au niveau système, que ce soit en termes économiques ou techniques. Par exemple, la recherche d'un faisceau bien collimaté et très lumineux induira un besoin en sources très lumineuses mais de surface réduite. Ceci se traduira par un courant de fonctionnement élevé et donc par un rendement lumineux moindre, mais aussi par de fortes contraintes sur les performances de la dissipation thermique requise. Au contraire, si on recherche plutôt une source étendue pour un éclairage aux ombres atténuées, on pourra travailler à plus faible courant en multipliant le

nombre de puces LED et en privilégiant ainsi le rendement lumineux. Il s'agit de faire, la plupart du temps, des compromis technico-économiques pour déterminer le nombre de LED à utiliser pour un produit de spécifications bien définies.

Il n'y a donc pas de solution unique pour le packaging des LED. Au contraire, les fabricants ont développé des approches variées en visant des solutions répondant aux différents besoins des utilisateurs. Ces derniers classent leurs produits suivant la puissance électrique acceptable (**tableau 1**).

Terminologie	Classe de puissance
Low-power	< 0.15 W
Mid-power	0.15 – 0.7 W
High-power	0.7 – 6 W
Ultra-high-power	> 6 W

Tableau 1 : Classes de LED chez Osram Opto Semiconductors.

⁸ Toute la puissance électrique fournie, non convertie en lumière quittant le dispositif, se dissipe au final sous forme thermique, qui s'évacue essentiellement par conduction jusqu'au dissipateur.

●●● Les boîtiers et le type de montage utilisés dépendent de la densité surfacique de puissance résiduelle à dissiper. Les technologies de packaging des LED ont fortement évolué ces dernières années. On distingue en général trois types de montage :

- le montage CSP (Chip Scale Package), réservé à des LED de faible à moyenne puissance, où la LED est conçue pour être directement montée sur le PCB (**figure 7**). Cette solution minimise les interfaces thermiques et permet ainsi de réduire les coûts globaux du système ;

- pour des puissances moyennes à élevées, la puce LED est montée dans un boîtier aux caractéristiques thermiques optimisées (**figure 8**) ;



Figure 7 : Exemple de LED « CSP » - LUXEON FlipChip White – Source : LumiLED.



Figure 8 : Exemple de packaging pour LED de haute puissance - OSRAM OSCONIQ® – Source : Osram.

- le montage COB (Chip on Board) est destiné essentiellement à des sources LED de grandes à très grandes puissances constituées de nombreuses puces LED sur une même embase céramique ou à cœur métallique. Il est réservé à des sources



Figure 9 : E: Exemple de montage « COB » - (Samsung LC013/26/40B. Les chips LED sont montées sur un PCB à cœur métallique – Source : Samsung.

étendues peu adaptées à des éclairages collimatés (**figure 9**).

Durée de vie

La durée de vie d'une LED dépend des conditions d'utilisation. Généralement, on est confronté à une décroissance continue de ses performances plutôt qu'à une panne brutale suite à laquelle le composant ne fonctionne plus. Du coup, la durée de vie d'une LED ne peut être exprimée que de manière statistique dans des conditions d'utilisation bien précisées.

“Les durées de vie annoncées après essais sont plutôt de l'ordre de quelques dizaines de milliers d'heures, généralement entre 30 000 et 60 000 heures.”

On a pu lire dans certaines publicités des durées de vie de 100 000 heures et plus. Les fabricants sérieux estiment la durée de vie de leurs LED selon la norme IES LM-80. Cette dernière demande de relever l'évolution du flux lumineux sur des durées de 6 000 h et plus, sous différentes conditions de température et de courant. A partir de ces résultats, ils effectuent des projections de durée de vie sur des durées plus importantes en utilisant les lois statistiques prévues par la normalisation.

La durée de vie s'exprime finalement par la durée au bout de laquelle B % d'un échantillon de LED émettent un flux lu-

mineux inférieur à L % du flux initial. Par exemple, la durée de vie à B50-L70 correspond à la durée d'utilisation (à des valeurs de température et de courant qui doivent être précisées) au bout de laquelle plus de 50 % des LED testées émettent un flux inférieur à 70 % du flux initial.

Les durées de vie annoncées après essais sont plutôt de l'ordre de quelques dizaines de milliers d'heures, généralement entre 30 000 et 60 000 heures ⁹.

Température de couleur et indice de rendu de couleur

Ce sont deux paramètres dont on ne se souciait guère avec les lampes à incandescence, car elles affichaient une température de couleur (CCT) de 2 700 K (ou 3 000 K pour les lampes halogènes) et un indice de rendu de couleur (CRI) toujours égal à 100. Ils deviennent importants avec les LED. En effet, la température et l'indice de rendu de couleur sont définis au moment de la conception du produit et ne sont pas déterminés par la technologie. Pour une LED blanche donnée, le fabricant

propose souvent une température de couleur au choix couramment comprise entre 3 000 et 6 000 K, et des CRI qui peuvent évoluer entre 70 et 90, voire plus. Même si, à terme, les LED de 3 000 K devraient présenter une efficacité lumineuse identique à celle de 6 000 K (Cf la feuille de route de la figure 2), ce n'est pas encore le cas actuellement ; de même les LED avec un CRI de 90 sont moins efficaces que des LED avec un CRI de 70.

⁹Voir par exemple le document de Cree disponible sur internet : https://www.cree.com/LED-components/media/documents/LM80_Results.pdf

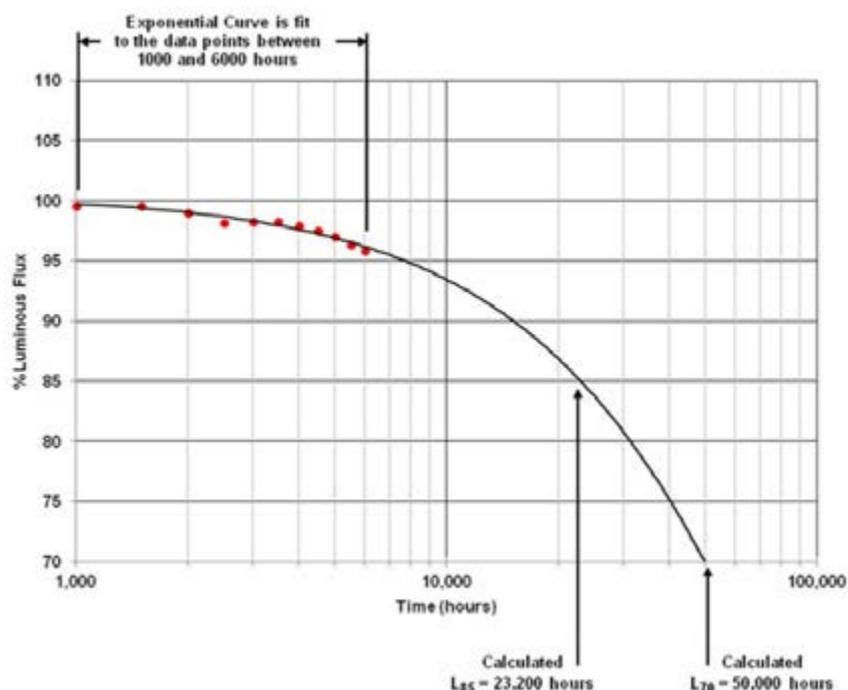


Figure 10 : Exemple d'extrapolation de l'évolution du flux et estimation de la durée de vie – Source CREE ¹⁰.

Le tri en fin de fabrication ou binning

Compte-tenu des dispersions de fabrication, que ce soit au niveau des opérations sur la plaquette de substrat ou lors de la mise en place de luminophores, les caractéristiques finales des LED issues d'un même lot de fabrication sont dispersées. Les fabricants doivent donc les tester et les trier suivant leurs caractéristiques afin de fournir à leurs clients des lots homogènes correspondants à leur attente.

Un lot est généralement spécifié par une plage de couleur, de tension directe et de luminosité sous un couple courant/température fixé. Les plages de couleur sont définies par rapport à la norme ANSI C78.377 qui garantit une hétérogénéité de couleur imperceptible à l'œil, ce qui n'est pas le cas de la seule température de couleur (figure 11). On aboutit à des codes de commande relativement complexes, mais qui garantissent à l'acheteur des produits homogènes en spécifications.

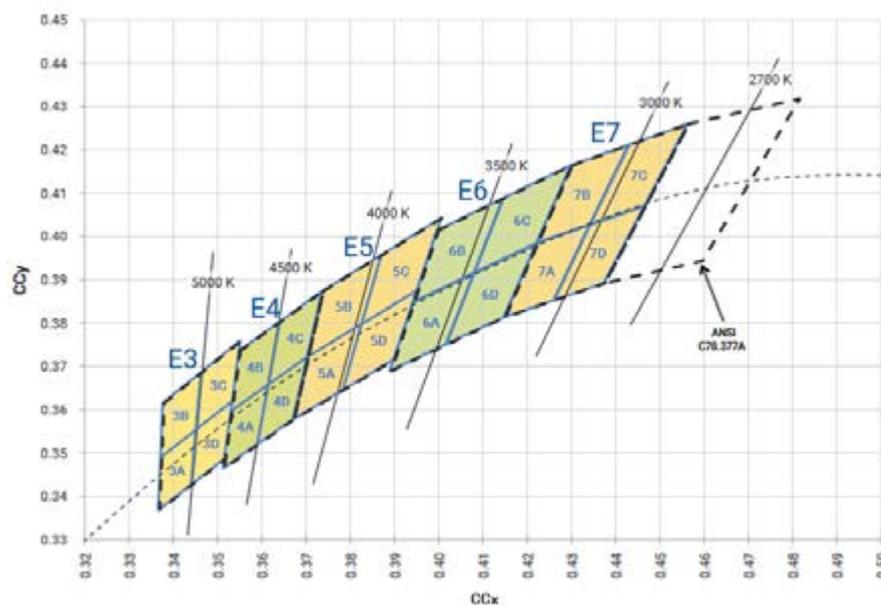


Figure 11 : Exemple de « bin » ou « kit » assorti des codes de commandes garantissant au client une homogénéité de couleur – Source CREE ¹¹.

Le tri après fabrication est bien sûr une opération coûteuse pour le fabricant ; elle peut être contraignante pour l'acheteur qui peut avoir du mal à accéder à certains bins, mais semble intrinsèque aux technologies de fabrication et risque de perdurer.

d'ici à 2025. On ne peut guère imaginer aller au-delà sans détériorer les qualités spectrales, et donc le rendu de couleur, des LED blanches. Quoiqu'il en soit, on est bien au-delà des lampes halogènes et leur 20 lm/W ! ■

Patrick Mottier

Ancien responsable des programmes de R&D LED
CEA-LETI

¹⁰ https://www.cree.com/LED-components/media/documents/XLamp_Lumen_maintenance.pdf

¹¹ Voir par exemple <https://www.cree.com/LED-components/media/documents/ds-XHP502.pdf>

Résumé

Cet article traite de l'émergence et des perspectives des LED dans le domaine de l'éclairage. L'état de l'art des LED à leur apparition sur ce marché – à savoir l'invention de la LED bleue et un article visionnaire qui prévoyait il y a 20 ans que le progrès technique atteindrait des rendements lumineux de 225 lm/W – sont rappelées. Ensuite, les différents constituants de la LED blanche : LED bleue, luminophores et emballage sont décrits et commentés. L'accent est mis sur l'efficacité lumineuse des LED et sa sensibilité au courant qui la traverse ainsi qu'à sa température. Enfin, il est exposé comment, contrairement aux autres technologies d'éclairage, les LED permettent de fabriquer des sources lumineuses à la température de couleur et à l'indice de rendu des couleurs souhaités. En revanche, cette flexibilité et cette variabilité de fabrication induisent un besoin de tri en fin de fabrication et une catégorisation des LED en fonction de leurs caractéristiques: le binning. ■

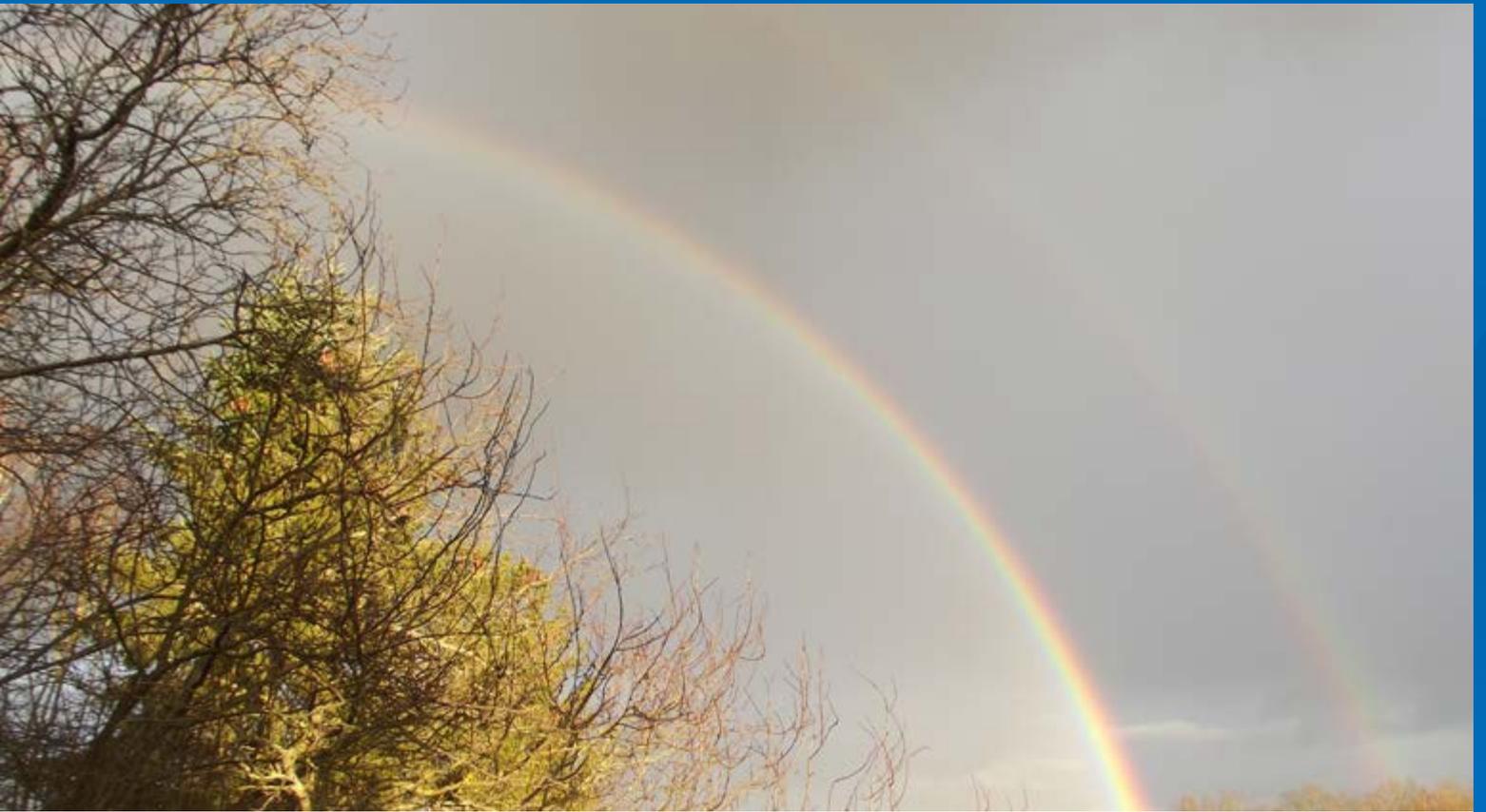
Abstract

This article deals with the emergence and perspectives of LEDs in the field of lighting. The state of the art of LEDs on their appearance on this market - namely the invention of blue LEDs and a visionary article which predicted 20 years ago that technical progress would reach light yields of 225 lm/W - are recalled. Then, the various constituents of the white LED: blue LED, phosphors and packaging are described and commented on. Emphasis is placed on the luminous efficacy of LEDs and its sensitivity to the current flowing through it and to temperature. Finally, it is explained how, unlike other lighting technologies, LEDs make it possible to manufacture light sources at the desired color temperature and color rendering index. On the other hand, this flexibility and variability in manufacturing induce a need for sorting at the end of manufacturing and a categorization of LEDs according to their characteristics: binning. ■



Bibliographie

- [1] R. Haitz, F. Kish, J. Tsao et J. Nelson, «The case for a national research program on semiconductor lighting», Sandia National Laboratories, 2000.
- [2] «2018 Solid-State Lighting R&D Opportunities», US Department of Energy, 2019.
- [3] S. Wouter, «High luminance LEDs: LED- and luminaire-level performance», DOE SSL Technology Development Workshop, 2017.
- [4] D. Zhu et C. J. Humphreys, Solid-State Lighting Based on Light Emitting Diode Technology, Springer, 2016.



Lumière artificielle et santé humaine

Une relation complexe

La lumière artificielle. Sa maîtrise a permis le développement d'outils thérapeutiques révolutionnaires, comme le laser à usage médical ; mais elle est aussi utilisée dans des pseudo-thérapies populaires au mépris des règles de sécurité oculaire tandis que certains s'inquiètent des effets sanitaires des nouvelles ampoules à LED. Zoom sur une relation complexe entre lumière artificielle et santé humaine.

Introduction

La lumière est une onde électromagnétique, ce pourquoi on la désignait autrefois par le terme de « champ lumineux ». La nature de la lumière, qu'elle soit visible ou non (ultraviolet, infrarouge), n'est pas différente de la nature d'un rayonnement X ou d'un rayonnement radiofréquence. Seules les fréquences de variation des champs électriques et magnétiques qui les composent – donc l'énergie qu'elles transportent et le type d'interaction avec la matière, notamment vivante – différencient ces ondes. La lumière « visible » a par ailleurs ceci de spécifique qu'elle peut

être détectée par l'œil humain qui y est à la fois transparent et sensible. L'homme a su tirer profit de l'énergie transportée par ces champs lumineux, dans de nombreuses applications médicales, avec plus ou moins de succès. Il a également compris que la lumière, dans certaines conditions d'exposition, peut devenir un véritable facteur de risque d'apparition de brûlures, de lésions phototoxiques, de tumeurs cancéreuses, ce qui a conduit parfois à l'émergence d'un sentiment de méfiance largement injustifié à l'égard de certaines nouvelles technologies, comme les ampoules LED ou les écrans informatiques.

Le sujet est complexe. Nous proposons, à travers cet article, un survol de la relation multiforme reliant lumière artificielle et santé humaine, qui oscille entre amour et désamour...

Un véritable outil thérapeutique

Au début du XXe siècle en Europe, l'heure était au combat face au rachitisme et à la tuberculose humaine, due au bacille de Koch. L'héliothérapie fut alors un mode de traitement largement employé, parce qu'elle devait permettre d'augmenter, sous l'action des rayons ultraviolets ●●●



L'auteur

Sébastien Point est docteur en physique, ingénieur en optique et licencié en psychopathologies. Il est responsable de R&D dans l'industrie de l'éclairage. Auteur de nombreux ouvrages et articles scientifiques traitant des effets biologiques et psychologiques de l'éclairage artificiel, il est membre du comité de rédaction de la revue *Science et pseudo-sciences*, dans laquelle il tient une rubrique visant à déconstruire les discours pseudoscientifiques. Sébastien Point est récipiendaire de la médaille de la Société française de radioprotection, dont il est l'actuel président de la section Rayonnements non-ionisants. Il est également membre de la SEE.

solaires ou parfois artificiels, la production de vitamine D, à partir du stérol de l'organisme des patients rachitiques ; le traitement était également largement prescrit aux malades atteints de tuberculose extra-pulmonaire, dans le cadre d'une climatothérapie. Tout cela pour des résultats très mitigés et sans aucune prise en compte à l'époque du potentiel carcinogénique des ultraviolets... Le rachitisme est désormais soigné ou prévenu bien plus efficacement par l'administration de vitamine D, dès la naissance et jusqu'à l'âge de deux ans ; quant à la tuberculose, un traitement efficace n'a véritablement vu le jour qu'après l'apparition de l'anti-biothérapie et la vaccination qui a permis d'éradiquer, ou presque, la maladie dans les pays industrialisés. Plus récemment, de multiples thérapies alternatives, comme la chromothérapie, l'acupuncture par laser ou encore la phosphénologie se sont développées. Ces thérapies sans le moindre fondement scientifique sont non seulement inefficaces, mais également risquées, puisque toutes préconisent l'exposition prolongée et/ou rapprochée à des sources de lumière artificielle ou naturelle, sans encadrement médical ni prise en compte des risques pour la peau ou l'œil. L'utilisation de la lumière pour soigner n'est-elle donc qu'une velléité chimérique faisant les choux gras des charlatans ? Non ! Bien comprise et correctement utilisée, la lumière peut être mise à profit dans de nombreuses thérapies validées scientifiquement.

de la jaunisse, pathologie marquée par l'excès de bilirubine dans le sang. Cet excès a plusieurs causes potentielles, mais chez le nouveau-né, il est souvent lié à l'immaturité du foie. La photothérapie par lumière bleue fait partie de l'arsenal thérapeutique permettant de traiter cette affection : yeux bandés, l'enfant est exposé à une lumière bleue qui, absorbée par la bilirubine, la dénature efficacement et permet son élimination.

Le traitement de la jaunisse ne dure généralement que quelques jours, mais la lumière artificielle trouve aussi des applications pour un trouble chronique nécessitant un traitement plus long, la dépression saisonnière que l'on soupçonne d'être fortement liée à la baisse de quantité de lumière en automne et en hiver. En effet, nos rétines abritent des cellules sensibles non-visuelles, dites cellules à mélanopsine, qui envoient des signaux au noyau suprachiasmatique de l'hypothalamus, dans le cerveau, qui participe largement, par le contrôle qu'il opère sur l'hypophyse et l'épiphyse, à l'équilibre métabolique de l'organisme et au maintien de notre horloge biologique. L'exposition à la lumière influe donc, par la voie hypothalamique, sur de nombreux processus hormonaux. Cette observation est à la base de la luminothérapie, qui consiste à administrer au patient, par exposition à des sources d'éclairage artificielle, la dose de lumière que le Soleil ne lui fournit plus.

“ La photothérapie par lumière bleue fait partie de l'arsenal thérapeutique permettant de traiter cette affection : yeux bandés, l'enfant est exposé à une lumière bleue qui, absorbée par la bilirubine, la dénature efficacement et permet son élimination. ”

Ainsi, la lumière bleue – trop injustement décriée de nos jours comme nous le verrons plus loin – trouve d'intéressantes applications médicales, au premier rang desquelles on peut citer le traitement

La lumière cohérente n'est pas en reste. Le premier rayon laser, associé aux noms de Townes, Schawlow, Maiman et Gould, a été produit en 1960. Et dès 1961, Campbell initiait son utilisation en médecine. Cet outil s'est révélé utile depuis dans de nombreux traitements, puisque, grâce à la finesse du faisceau lumineux produit, il permet de concentrer une quantité importante d'énergie sur une cible de taille extrêmement réduite. L'action du laser sur les tissus dépend de sa longueur d'onde, de sa puissance, de son mode d'émission et de la nature physico-chimique des tissus visés. Mais en résumé, un rayonnement laser peut agir,

suivant ses caractéristiques et celles de la cible, par l'intermédiaire de quatre effets : l'effet thermique (conversion de l'énergie absorbée par les tissus en chaleur), l'effet photochimique (destruction par stress oxydatif de cellules photosensibilisées), l'effet mécanique (création d'un microplasma et d'une onde de choc associée permettant de casser les tissus) et enfin l'effet photoablatif (photodissociation athermique des molécules organiques). Généralement, une application thérapeutique met à contribution l'un de ces quatre effets, pour lequel le laser est optimisé par ses concepteurs, même si les autres phénomènes ne peuvent jamais être complètement annulés.

La lumière, toxique à haute dose...

Les applications médicales de la lumière, cohérente ou incohérente, sont donc multiples. Et à n'en pas douter, dans l'avenir, la lumière trouvera encore d'autres applications au bénéfice de notre santé et de notre bien-être. Pourtant, dans une époque caractérisée par une peur souvent irrationnelle des nouvelles technologies, la lumière artificielle inquiète. Et il est tout à fait exact, qu'à forte dose, la lumière peut être dangereuse, pour la peau et pour les yeux. C'est bien entendu vrai des lasers, mais également de la lumière incohérente. Toutes les sources de lumière, artificielle comme naturelle, d'intensité suffisante peuvent en réalité être à l'origine de brûlures ou de lésions phototoxiques, dont la nature dépend du spectre de la source : il existe une phototoxicité de la lumière infrarouge, dont une conséquence médicale est par exemple la cataracte à la chaleur, naguère typique chez les souffleurs de verre ; il existe une phototoxicité de la lumière ultraviolette, bien connue, essentiellement liée à une exposition solaire, à l'origine notamment des coups de soleil et de la cécité des neiges ; mais la lumière ultraviolette est également cancérigène, ce qui pose sérieusement la question du rapport bénéfique/risque des cabines de bronzage à UV. Leur usage serait en effet à l'origine de 450 000 cas de cancers cutanés

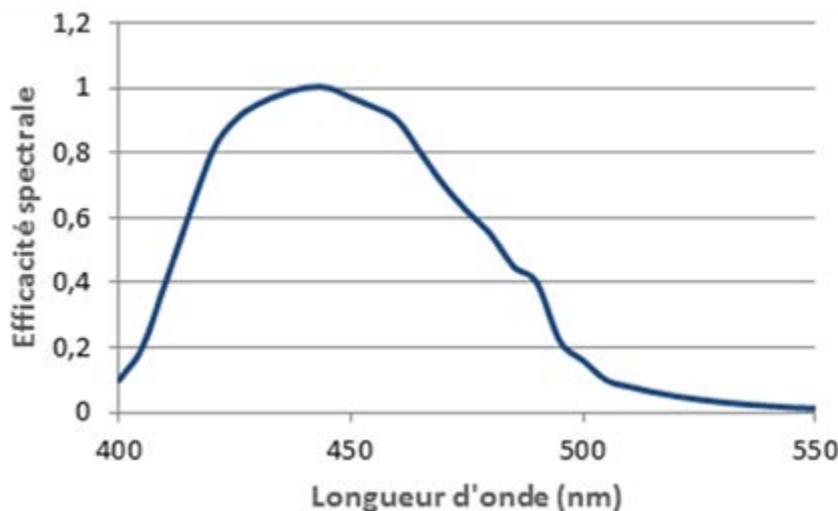


Figure 1 : Spectre d'action B(λ).

“En 1976, des chercheurs ont démontré la possibilité d'apparition de blessures photochimiques chez des singes rhésus exposés à une lumière bleue de forte intensité sur un temps court.”

non-mélanomes et 10 000 cas de mélanomes aux USA, en Europe et en Australie ¹ ...

Enfin, il existe une phototoxicité de la lumière bleue, dont on entend beaucoup parler aujourd'hui et que nous allons aborder plus longuement dans la suite de notre propos. Les lésions dues à la lumière bleue apparaissent essentiellement lors de l'observation du Soleil mais sont également potentiellement liées à une surexposition de la rétine à la lumière produite par des ampoules tungstène-halogène, des tubes fluorescents, des lampes à halogénures métalliques ou encore des LED blanches ou bleues, toutes émettrices de lumière bleue. En effet, en 1976, des chercheurs ont démontré la possibilité d'apparition de blessures photochimiques chez des singes rhésus ex-

posés à une lumière bleue de forte intensité sur un temps court. Ces dommages, dits de classe 2 (ou classe de Ham, du nom de l'un des chercheurs) sont caractérisés par la destruction de photorécepteurs et de l'épithélium pigmentaire rétinien sous un fort éclairage rétinien (>10 mW/cm²) ; ils sont consécutifs à des phénomènes de stress oxydatif, phénomènes dus à la production, au niveau de la rétine exposée, d'espèces réactives de l'oxygène en quantité suffisante pour dépasser les capacités des défenses anti-oxydantes de l'organisme. Le spectre d'action, c'est-à-dire l'efficacité avec laquelle la lumière peut engendrer ce phénomène de stress oxydatif, noté B(λ), est présenté en **figure1**.

La dose de luminance Db maximale admissible ² aux longueurs d'onde couvertes par B(λ) est de 106 J/m²/sr. Pour une taille de pupille de 3mm, cela représente une exposition énergétique réti-

¹ Wehner MR, Chren MM, Nameth D, et al. International prevalence of indoor tanning: a systematic review and meta-analysis [published correction appears in JAMA Dermatol. 2014 May;150(5):577]. JAMA Dermatol. 2014;150(4):390-400. doi:10.1001/jama-dermatol.2013.6896

² A noter que cette valeur bénéficie d'un facteur de sécurité de 5.

●●● nienne de 2,2 J/cm². Cependant, dose de luminance et exposition énergétique ne sont pas des grandeurs photométriques directement mesurables sur une source de lumière ; on mesure donc, pour les évaluer, la luminance efficace en lumière bleue (notée L_b) de la source de lumière. L_b est définie comme la somme intégrale, faite sur le spectre visible, du produit de $B(\lambda)$ par la luminance énergétique spectrique mesurée sur le champ de vision³ (notée $L_b(\lambda)$) (équation 1). La dose de luminance D_b est alors définie comme le produit de la luminance efficace en lumière bleue L_b par la durée d'exposition t (équation 2). Pour une durée d'exposition donnée, on déduit ainsi la valeur de L_b permettant de respecter la dose de luminance maximale et de classer la source de lumière dans l'un des quatre groupes de risque définis par la norme NF EN 62471 (voir encadré).

$$L_b = \int B(\lambda) \cdot L_b(\lambda) \cdot d\lambda \quad [W/m^2/sr] \quad \text{sur } 300-700 \text{ nm}$$

Equation 1

$$D_b = L_b \cdot t \quad [J/m^2/sr]$$

Equation 2

Le facteur de risque principal d'atteinte photochimique de la rétine par la lumière bleue est l'observation du Soleil. En effet, contrairement à une idée répandue, les rétinites solaires ne sont pas le fait d'un processus thermique (car la pupille est fortement contractée lors d'une observation du Soleil, ce qui réduit les possibilités

tentiels existent, comme des expositions longues et mal encadrées à des sources artificielles de forte intensité dans le cadre professionnel.

luminophore recouvrant la diode sont ensuite utilisées pour convertir (partiellement) la lumière bleue en une lumière moins énergétique et de plus

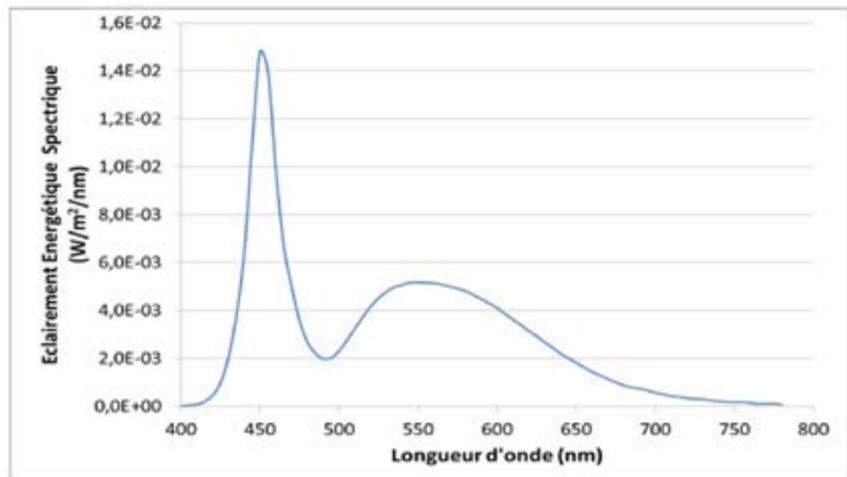


Figure 2 : Spectre typique d'une LED blanche à luminophore.

... mais des inquiétudes infondées autour de l'éclairage à LED

Cependant, ce sont bien les LED, et notamment les LED blanches utilisées pour l'éclairage ou le rétroéclairage des écrans, qui aujourd'hui cristallisent les inquiétudes de la population. On ne compte plus les articles de presse alertant sur les dangers des écrans ou des lampes à LED pour nos yeux ou la qualité de notre sommeil. Ce désamour est-il justifié ?

grande longueur d'onde (dans le jaune-orange). Le spectre d'une WPCLED est ainsi constitué par la réponse du luminophore à l'excitation du rayonnement bleu et de la partie non convertie de ce même rayonnement bleu (figure 2). La conséquence de ce mécanisme est que certaines LEDs peuvent être riches en lumière bleue et, si elles sont puissantes, doivent donc être considérées comme potentiellement toxiques ; ce risque est pris en compte aujourd'hui par la réglementation et les normes de sécurité photobiologique. Seules les ampoules LED présentant un risque phototoxique nul ou faible (voir encadré) sont autorisées pour le marché grand public, ce qui limite fortement le risque d'exposition aiguë pour le consommateur. Les luminaires et autres appareils d'éclairage à LED (projecteurs, éclairage de secours par exemple) peuvent eux, par « principe de réalisme » (puisque'il faut bien fournir de fortes puissances pour répondre à certaines applications...), appartenir au groupe de risque modéré mais sont soumis à un marquage, consistant en l'apposition d'un pictogramme et d'un avertissement dans la notice d'installation donnant la distance de sécurité pour laquelle le risque devient faible.

“La température maximum d'utilisation recommandée pour ne pas trop impacter la durée de vie est d'environ 100 °C à 150 °C.”

d'échauffement de la rétine) mais du processus photochimique que nous venons d'aborder. Ceci étant dit, d'autres cas po-

Très schématiquement, une LED est une diode à semi-conducteur dans laquelle la recombinaison de charge est radiative. Dans les LED blanches à luminophore (ou WPCLED pour White Phosphor Coated Light Emitting Diode), la diode est généralement constituée de nitrure d'indium galium (InGaN) et la lumière est émise autour de 450 nm de longueur d'onde. Les propriétés émissives d'un matériau

³ Le champ de vision est introduit dans la définition de L_b pour prendre en compte le mouvement de l'œil qui au cours d'une tâche d'observation n'est jamais fixe. Le terme «spectrique» signifie que la luminance est relative à une longueur d'onde déterminée.

Le consommateur est donc correctement protégé par les normes de sécurité photobiologique et les seuls cas réalistes d'exposition aiguë sont liés à des expositions professionnelles accidentelles⁴ à des lampes de forte puissance ou à un mauvais usage de la technologie par certaines thérapies alternatives (type chromothérapie)⁵. Pourtant, les résultats de certaines expériences récentes visant à exposer des rongeurs à de faibles niveaux d'éclairement produits par des LED blanches suggèrent que des lésions graves pourraient être générées sur la rétine pour des valeurs d'exposition largement inférieures aux limites normatives. Ces études faites sur des rats ont largement contribué à inquiéter les pouvoirs publics et les consommateurs. Cependant, comme nous l'avons montré par ailleurs^{6, 7}, dans les expériences à l'origine de ces publications, les conditions d'exposition des rats ne permettent pas une extrapolation directe à l'homme, car des facteurs de correction, liés aux différences entre la biométrie de l'œil du rat et de l'œil de l'homme, doivent nécessairement être introduits dans le calcul des expositions énergétiques (**tableau 1**). Le rapport F/D (focale d'œil sur diamètre de pupille) du rat en fait ainsi un modèle animal mal adapté, du point de vue optique, pour reproduire une exposition rétinienne humaine. Nous avons par ailleurs calculé que l'incertitude sur la valeur de la focale d'œil du rat permet de commettre des erreurs très significatives dans le calcul de l'éclairement rétinien (**figure 3**).

Ainsi, à l'heure actuelle, et contrairement à ce que laisse entendre le

⁴ Se référer à la fiche technique de la Société française de radioprotection "Lampes à LED et risque rétinien", rédigée par Sébastien Point et Annick Barlier-Salsi pour un aperçu des populations professionnelles à risque.

⁵ Point S., the danger of chromotherapy, Skeptical Inquirer, Volume 41, No.4, July / August 2017

⁶ Point S., Beroud M., Blue light hazard: does rat retina make relevant model for discussing exposure limit values applicable to humans?, Radioprotection, 2019 54(2).

⁷ Point S., Lumière bleue : L'homme est-il fait comme un rat ?, Editions Techniques de l'Ingénieur, coll. « Livre blanc », janvier 2019.

Taille de pupille Longueur focale	0,5 mm	5 mm
2,4 mm	$E_{\text{rat}} = 3,1 E_{\text{humain}}$	$E_{\text{rat}} = 313 E_{\text{humain}}$
5,25 mm	$E_{\text{rat}} = 0,65 E_{\text{humain}}$	$E_{\text{rat}} = 65 E_{\text{humain}}$

Tableau 1 : Rapport entre l'éclairement de la rétine humaine E_{humain} (calculé avec une taille de pupille de 2 mm et une distance focale de 17 mm) et l'éclairement de la rétine du rat E_{rat} (calculé avec différentes valeurs de focale et de taille de pupille extraites de la littérature). Pupille dilatée, l'œil de rat collecte plusieurs dizaines ou centaines de fois plus de lumière que l'œil humain - Source : Sébastien Point, Lumière bleue : éclairage à LED et écrans menacent-ils notre santé ? Editions Book-e-Book.

“Ainsi, à l'heure actuelle, et contrairement à ce que laisse entendre le traitement médiatique de cette question, aucune étude ne prouve que les LED en utilisation normale sont rétinotoxiques pour la population humaine.”

traitement médiatique de cette question, aucune étude ne prouve que les LED en utilisation normale sont rétinotoxiques pour la population humaine, même s'il existe une problématique spécifique aux enfants en très bas âge que nous évoquons plus loin. Et concernant les écrans, celui d'un or-

dinateur, d'un smartphone ou d'une tablette tactile produit une luminance typiquement dix fois plus faible que la luminance d'un tube fluorescent et un million de fois plus faible que la luminance du disque solaire... Le risque d'exposition aiguë est donc raisonnablement exclu.

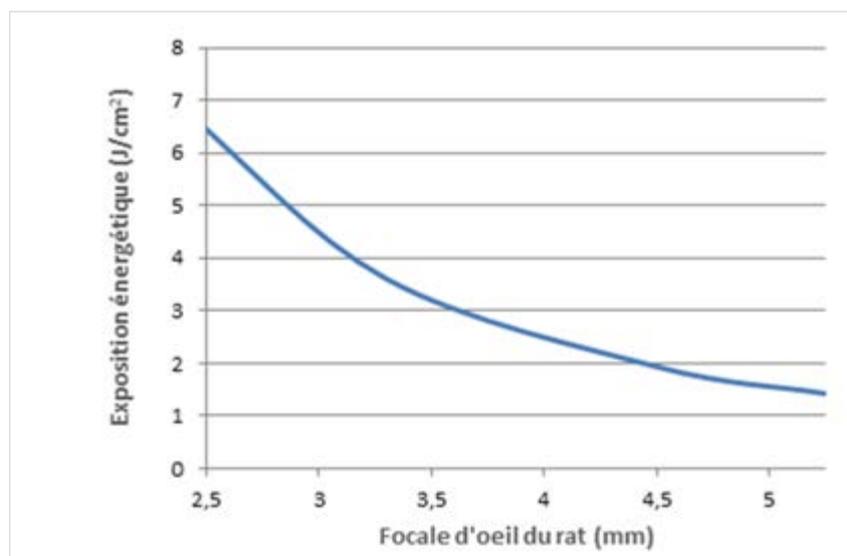


Figure 3 : Evolution de l'exposition énergétique au niveau de la rétine du rat en fonction des valeurs de focale choisies dans le calcul (extraites de la littérature), pour un diamètre de pupille de 5 mm (pupille dilatée). La limite d'exposition énergétique pour l'être humain (incluant une marge de sécurité de 5) est fixée à 2,2 J/cm². On remarque que le résultat du calcul de l'exposition énergétique peut, pour une source lumineuse donnée, et en fonction du choix fait pour la valeur de focale, être supérieur ou inférieur à cette limite. Source : d'après Point S., Beroud M., Blue light hazard: Does rat retina make relevant model for discussing exposure limit values applicable to humans? Radioprotection, 2019 54(2).

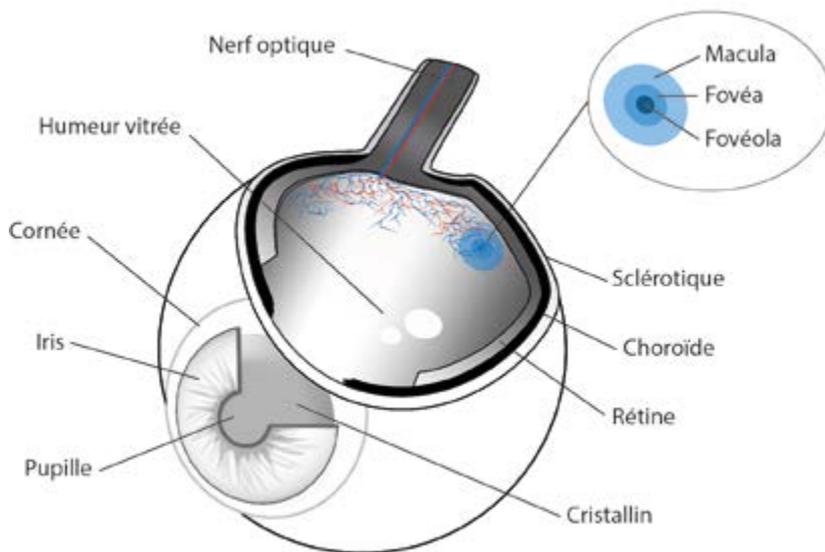


Figure 4 : Structure simplifiée de l'œil humain – Source: Maïlys Beroud.

“La lumière, quelle que soit sa composition spectrale, qu'elle soit naturelle ou artificielle, peut être toxique à haute dose.”

●●● **Les très jeunes enfants : une problématique spécifique**

Une problématique se pose néanmoins spécifiquement pour les très jeunes enfants. Nous avons abordé cette question dans un article paru en 2018⁸. Selon notre analyse, compte-tenu d'un rapport focale de l'œil/diamètre de pupille défavorable (voir **figure 4** pour un schéma simplifié de la structure du globe oculaire), l'œil des jeunes enfants (<1 an) collecte plus de lumière, ce qui devrait justifier la prise de précautions particulières vis-à-vis de leur exposition à l'éclairage naturel et artificiel, notamment celui produit par les jouets lumineux ou les veilleuses de nuit, et cela quelle que soit la technologie de source. Par ailleurs, la communauté scientifique met souvent en avant la transparence du cristallin des enfants comme un facteur de risque supplémentaire vis-à-vis de la lumière bleue produite par les LED. Concernant la transparence du cristallin,

qui favorise effectivement la pénétration des ondes courtes, nous avons calculé les effets biologiques potentiels sur la rétine du jeune enfant de trois types de lampes du commerce (halogène, fluorescente et LED), similaires en terme de puissance et de température de couleur, en utilisant le spectre d'action préconisé par l'ICNIRP (International Commission for Non-lo-

nizing Radiation Protection) pour l'œil aphaque⁹. Notre conclusion¹⁰ est que, par rapport à l'adulte, on ne doit pas attendre de risque supplémentaire pour le très jeune enfant lié à l'utilisation d'une lampe à LED blanche ou bleue, qui n'émet pas de lumière violette pour laquelle la transparence de l'œil très jeune est plus grande que celle de l'œil adulte, contrairement notamment aux lampes halogène. S'ils permettent de relativiser le « danger » des LED, ces résultats ne permettent cependant pas de répondre à la question des conséquences d'une co-exposition à la lumière bleue et à la lumière violette (naturelle ou issue des lampes de type tungstène-halogène par exemple).

S'éclairer juste

La lumière artificielle est incontestablement un outil qui continuera d'être l'allié de la santé humaine grâce notamment aux talents des ingénieurs qui parviennent

⁹ Un oeil aphaque est un oeil sans cristallin. La cause la plus courante en est l'opération de la cataracte. Appliquer le spectre d'action de l'œil aphaque à l'enfant revient à considérer que la transmission de la lumière par le jeune cristallin est de 100 %. C'est donc une approche particulièrement protectrice.

¹⁰ La validité de cette conclusion est bien entendu dépendante de la pertinence du choix du spectre d'action de l'œil aphaque pour modéliser la transparence de l'œil du très jeune enfant.

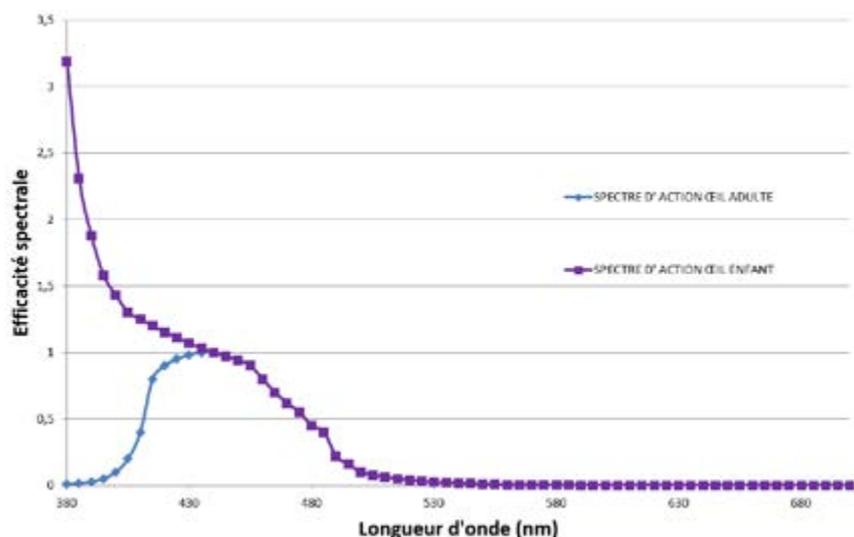


Figure 5 : Spectre d'action pour l'œil adulte (B(λ)) et spectre d'action pour l'œil de l'enfant (identifié au spectre d'action de l'œil aphaque A(λ)), sur le visible et le proche UV. Notez qu'à 450 nm de longueur d'onde (pic d'émission bleu des LED blanches à luminophore), les deux spectres sont identiques.

⁸ Point S., Blue Light Hazard: are exposure limit values protective enough for newborn infants? Radioprotection 2018, 53(3).

à la produire et à la dompter ; mais il faut garder à l'esprit que la lumière, quelle que soit sa composition spectrale, qu'elle soit naturelle ou artificielle, peut être toxique à haute dose. Cela justifierait par exemple d'encadrer un certain nombre de thérapies alternatives basées sur la lumière, auxquelles s'adonnent certains de nos concitoyens sans conscience des risques. À l'inverse, les risques de phototoxicité rétinienne entourant l'éclairage et les écrans à LED sont largement exagérés et ne justifient pas les nombreuses inquiétudes qui émergent aujourd'hui dans notre société. Reste pourtant de réelles questions : de plus en plus de résultats suggèrent que l'omniprésence de la lumière artificielle dans notre environnement, à des heures ou notre organisme doit être dans le noir, est préjudiciable à l'horloge biologique de l'être humain et il s'agira de répondre à cette problématique par des mesures adéquates. Ces mesures ne devront pas être basées sur un rejet de l'éclairage artificiel, mais plutôt sur des actions pédagogiques pour instruire les bonnes pratiques aux utilisateurs d'appareils lumineux et sur des efforts d'ingénierie pour faire en sorte que l'éclairage artificiel, notamment public, bénéficie des dernières technologies de l'information et de la communication pour éclairer juste, dans le respect des rythmes

Classification actuelle des lampes et appareils d'éclairage, suivant la norme de sécurité photobiologique EN62471

Sont classées dans le groupe de risque nul (RG0), les sources de lumière que l'on peut observer, à une distance de 20 cm, pendant 10 000 secondes avant d'exposer la rétine à un dépassement de la valeur limite aujourd'hui admise. Il s'agit des sources lumineuses dont la luminance efficace en lumière bleue est inférieure à 100 W/m²/sr.

Sont classées dans le groupe de risque faible (RG1) les sources de lumière que l'on peut observer, à une distance de 20 cm, jusqu'à 100 secondes avant d'exposer la rétine à un dépassement de la valeur limite. Il s'agit des sources lumineuses dont la luminance efficace en lumière bleue est supérieure à 100 W/m²/sr mais inférieure à 10 000 W/m²/sr.

Sont classées dans le groupe de risque modéré (RG2) les sources de lumière que l'on peut observer, à une distance de 20 cm, jusqu'à 0,25 seconde, c'est-à-dire le temps nécessaire pour que les mécanismes d'évitement (fermeture des paupières, détournement du regard) se mettent en place. Il s'agit des sources lumineuses dont la luminance est supérieure à 10 000 W/m²/sr mais inférieure à 4 000 000 W/m²/sr.

Sont enfin classées dans le groupe de risque élevé (RG3) les sources de lumière que l'on ne peut observer – même moins de 0,25 seconde – sans s'exposer à un dépassement de la valeur limite. Il s'agit des sources lumineuses dont la luminance efficace en lumière bleue est supérieure à 4 000 000 W/m²/sr. En pratique, dans le domaine de l'éclairage, on ne rencontre pas de sources de ce type.

biologiques de l'être humain, mais aussi dans le respect de ses besoins sociaux et professionnels. ■

Sébastien Point

Docteur en physique, ingénieur en optique, licencié en psychopathologies

POUR ALLER PLUS LOIN...

Sébastien Point, Lampes toxiques : des croyances à la réalité scientifique, Editions Book-e-Book, 2016.

Sébastien Point, Lumière bleue : éclairage à LED et écrans menacent-ils notre santé ? Editions Book-e-Book, 2019.

Résumé

D'un côté, la lumière artificielle fait partie de l'arsenal thérapeutique de la médecine scientifique, qu'il s'agisse de l'utiliser pour pallier le manque chronique de lumière naturelle en automne et en hiver, ou sous forme de laser pour corriger les amétropies ou encore casser les calculs rénaux. D'un autre côté, elle inquiète une population sensible à certains discours alarmistes affirmant que les LED vont nous rendre aveugles et réclamant le retour aux lampes à incandescence. En marge de tout cela, des pseudo-thérapies détournant les technologies de sources lumineuses se développent, posant un double problème de santé publique : celui d'écarter les malades d'un parcours de soin efficace et celui d'exposer les utilisateurs de ces pseudo-thérapies à des sources de lumière puissantes sans aucun contrôle des distances et durées d'exposition, en toute méconnaissance des problématiques de sécurité oculaire. À travers cet article, nous proposons d'examiner, de manière pragmatique, les liens complexes qui unissent la lumière artificielle et la santé humaine. ■

Abstract

On the one hand, artificial light is part of the therapeutic arsenal of scientific medicine, whether to use it to compensate for the chronic lack of natural light in autumn and winter, or as a laser for correcting ametropia or breaking kidney stones. On the other hand, it worries a population sensitive to certain alarmist speeches stating that the LEDs will make us blind and demanding the return to the old incandescent bulbs. Alongside all this, pseudo-therapies diverting light source technologies are developing, posing a double public health problem: that of keeping patients away from an effective care pathway, and that of exposing users of these pseudo-therapies to light sources without any control of distances and exposure duration, with little knowledge of eye safety issues. Through this article, we propose to examine, in a pragmatic way, the complex relations between artificial light and human health. ■



Eclairage horticole : pourquoi choisir la technologie LED ?

L'éclairage artificiel permet d'améliorer la productivité et la qualité des produits de la filière horticole. C'est un remède à la raréfaction des sols et un moyen de lutter contre la pollution. L'arrivée des LED offre de nouvelles possibilités d'adaptation de l'éclairage aux besoins de la plante tout en offrant une meilleure efficacité énergétique.

Introduction

La sécurité alimentaire reste un enjeu majeur pour de nombreux pays. Les efforts pour répondre à ce défi sont mis à mal par la croissance démographique mondiale et la diminution des terres cultivables. Par ailleurs, les méthodes agricoles actuelles telles que l'utilisation des engrais et des pesticides ont des effets néfastes sur l'environnement (pollution des sols et des nappes phréatiques) et sur la santé humaine (allergies, perturbateurs endocriniens, cancers, intoxications alimentaires). Pour répondre aux besoins alimentaires croissants, plusieurs techniques de culture agricole

sont mises en œuvre notamment l'horticulture. La filière horticole comprend la production de fruits, de légumes et de fleurs. Ces dernières années, l'horticulture connaît un développement notable et occupe une part très importante dans la production agricole mondiale. En France, plus de 3 300 entreprises exercent leur activité dans la chaîne de production de l'horticulture. Cette filière génère un chiffre d'affaires qui s'élève à 1,4 milliard d'euros. En aval, le secteur mobilise près de 20 000 entreprises spécialisées dans la distribution et la commercialisation pour un chiffre d'affaires de 7,09 milliards d'euros avec près de 60 000 emplois.

Pour faire face à certaines contraintes, notamment les changements de saisons, les contaminations des cultures ou la diminution des terres cultivables, les cultures en milieu contrôlé ont été développées et sont privilégiées. En outre, avec les avancées technologiques, des outils informatiques et électroniques sont intégrés dans ces milieux pour une gestion optimale des paramètres climatiques (température, humidité, taux de CO₂, lumière). Parmi ces paramètres climatiques, la lumière est l'un des facteurs majeurs pour assurer la croissance des plantes et une bonne rentabilité aux producteurs. Les serres, et obligatoirement les usines de plantes, nécessitent un

éclairage d'appoint. Par ailleurs, l'éclairage artificiel, en plus de déterminer la croissance, détermine aussi le goût et la qualité nutritionnelle des légumes et des fruits de serre.

Diverses technologies d'éclairage artificiel, notamment les sources de lumière classiques (incandescence, fluorescence, sodium haute pression [HPS]), sont utilisées comme sources d'éclairage dans les serres. L'utilisation de la technologie des diodes électroluminescentes (LED) pour l'éclairage horticole est récente mais les parts de marché de l'éclairage LED sont déjà conséquentes et en constante augmentation. Sur le plan de la recherche scientifique, de nombreuses études ont montré le potentiel des LED comme source de lumière efficace pour la croissance des plantes en milieu contrôlés [1],[2]. En plus de leur efficacité énergétique, les avantages des LEDs résident dans la possibilité de recomposer le spectre idéal et d'ajuster l'intensité lumineuse nécessaire pour la photosynthèse, la synthèse et l'accumulation de composés phytochimiques au niveau des plantes.

Le rôle de la lumière dans la croissance des plantes

Les photoréponses des plantes

La lumière influence les différentes phases de croissance de la plante depuis

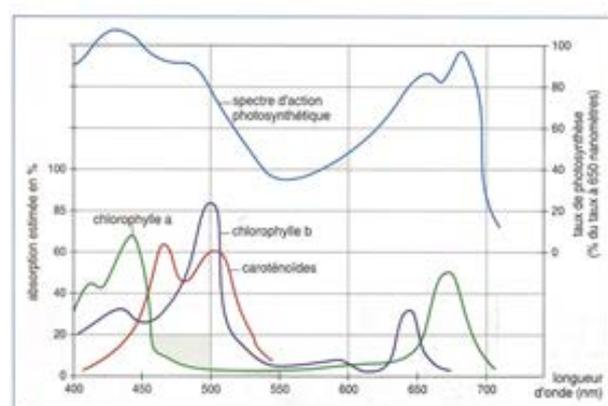
la germination jusqu'à la fructification. Il existe deux types de rayonnement efficace pour les plantes : le rayonnement physiologiquement actif et le rayonnement photosynthétiquement actif (*photosynthetically active radiation* ou PAR). Le rayonnement physiologiquement actif et le PAR couvrent respectivement les bandes de spectre allant de 300 à 800 nm et de 400 à 700 nm. Ces rayonnements interviennent aussi bien dans les processus des différentes photoréponses – photosynthèse et photomorphogénèse (photopériode et phototropisme) – que pour la synthèse de pigments et autres composés phytochimiques.

en tant que signal pour le contrôle de leur développement (photomorphogénèse) d'autre part, comme l'illustre la **figure 1**. La photosynthèse est réalisée grâce à la chlorophylle « a », dit « pigment principal », qui absorbe les longueurs d'onde dans le bleu (470 nm) et dans le rouge (660 nm). Les autres pigments, qualifiés de pigments secondaires, la chlorophylle « b » et les caroténoïdes, absorbent respectivement dans le bleu, le rouge et le jaune. Ces pigments transmettent les lumières qu'elles absorbent à la chlorophylle « a ». Ainsi, ils permettent à la plante d'absorber la lumière dans une large bande spectrale. La photomorphogénèse est réalisée

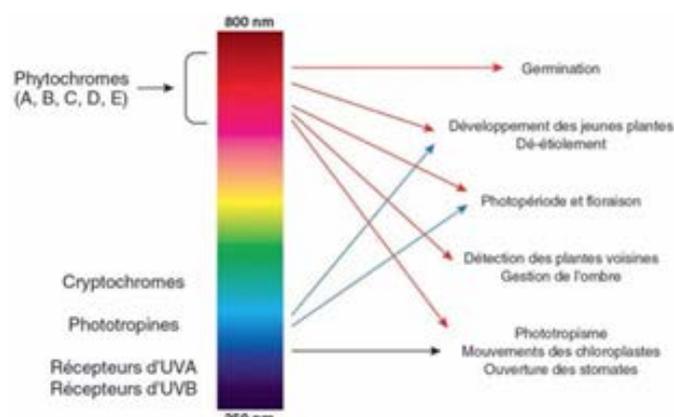
“ Les LEDs permettent également de réduire le coût énergétique avec un éclairage intermittent à haute fréquence sans impact ni sur la durée de vie de la source d'éclairage, ni sur l'efficacité photosynthétique. ”

Contrairement à l'homme qui utilise la lumière principalement pour la vision, les végétaux l'utilisent sous deux formes. En effet, ils convertissent l'énergie lumineuse en énergie chimique (photosynthèse) d'une part et captent la lumière

grâce à des photorécepteurs qui captent la lumière dans des bandes de spectres bien spécifiques (figure 1b). Il s'agit des phytochromes sensibles aux lumières rouges et proche infrarouges et qui régulent pratiquement toutes les phases de ●●●



(a)



(b)

Figure 1 : Absorption de la lumière par la plante : (a) spectre d'absorption des pigments chlorophylliens et spectre d'action photosynthétique

Source : <https://www.monprofsvt87.com> (b) spectre de la lumière dans le processus de photomorphogénèse - Source : <https://www.captteurs-et-mesures-agralis.com>



Laurent Canale

est ingénieur de recherche au CNRS, laboratoire LAPLACE, équipe Lumière et Matière. Il est docteur en électronique des hautes fréquences et optoélectronique, président de l'Association française de l'éclairage Midi-Pyrénées et secrétaire de l'Industrial Light & Display Committee de l'IEEE. Ses recherches portent sur les LED et OLED. Il a dirigé deux thèses soutenues en 2017 et en dirige actuellement deux autres en cours. Il collabore également à plusieurs programmes européens. En 2019, il obtient un financement pour son programme MELINA, Mastering Efficient Lighting In North Africa.

développement des plantes. Ensuite, les phototropines captent la lumière bleue pour le processus de phototropisme (orientation de la plante vers la lumière). On a également les photochromes qui eux absorbent la lumière rouge pour réaliser le photopériodisme (impact de la durée du jour et de la nuit sur diverses réactions physiologiques). Le photopériodisme influence le temps de floraison. Enfin, les cryptochromes impliqués dans le rythme circadien des plantes captent la lumière bleue.

Enfin, les LEDs permettent également de réduire le coût énergétique avec un éclairage intermittent à haute fréquence sans impact ni sur la durée de vie de la source d'éclairage, ni sur l'efficacité photosynthétique. L'éclairage intermittent favorise la croissance et l'accumulation de composés phytochimiques dans la culture de nombreuses plantes et constitue un moyen de faire des économies d'énergie supplémentaires.

Production de composés phytochimiques

De nombreuses études ont montré que l'accumulation de composés phytochimiques (vitamines, sucres solubles, protéines, antioxydants), dans les légumes ou les fruits, dépend de plusieurs facteurs. Il s'agit notamment du génotype, des conditions d'éclairage, de la température ambiante, de l'irrigation et de la fertilisation. En outre, il a été rapporté que la synthèse et l'accumulation de composés phytochimiques chez les plantes étaient bien corrélées avec l'activité photosynthétique. Par conséquent, des conditions d'éclairage optimales sont d'une importance capitale pour favoriser l'accumulation de ces composés [3], [4]. Par ailleurs, les légumes contiennent aussi des substances nocives, telles que l'acide nitrique et l'oxalate, qui s'accumulent facilement et en excès chez des plantes telles que la laitue et les épinards, en particulier pendant la culture hors saison. Les raisons de cette accumulation incluent les fluctuations ou l'inadaptation de la lumière (intensité, spectre et distribution spatiale) [3].

Les conditions de lumière (le spectre lumineux) et les engrais azotés sont les principaux facteurs affectant l'accumulation de nitrates dans les plantes. En effet, la lumière rouge, contrairement à la lumière bleue, réduit efficacement la concentration en nitrates chez les

“De façon générale, comparées aux autres spectres de lumière, les lumières rouges et bleues sont plus efficaces pour augmenter le sucre soluble et les niveaux de protéines solubles dans les légumes produits en milieux contrôlés, respectivement.”



(a)



(b)

Figure 2 : Eclairages horticoles à LED en milieux contrôlés (a) dans une serre – Source : <https://hortamericas.com/> (b) : dans une usine de plantes Source : <https://www.ledsmagazine.com/>

plantes. Cependant, la lumière bleue augmente la concentration en azote.

Concernant la synthèse et l'accumulation d'oxalates, des études ont montrées que la lumière UV (et particulièrement l'UV-B) et la lumière rouge sont respectivement efficaces pour augmenter et diminuer l'accumulation d'oxalate dans les légumes cultivés en environnements contrôlés [3].

Par ailleurs, la qualité de la lumière influence significativement la synthèse et l'accumulation de protéines et de sucres solubles. En effet, de façon générale, comparées aux autres spectres de lu-

composés phytochimiques au cours de la croissance de la plante dépendent en grande partie des conditions d'éclairage (spectre et intensité lumineuse). Il est donc important d'utiliser des systèmes d'éclairage qui, en plus d'être efficaces énergétiquement, répondent aux besoins des plantes.

Les systèmes d'éclairage horticoles

Etats des lieux et potentiels des LED

Les installations horticoles peuvent être classées en deux catégories sui-

de la lumière. Les sources de lumière artificielle traditionnelles utilisées pour l'éclairage horticole comprennent les lampes à incandescence, les lampes au sodium haute pression (HPS), les lampes aux halogénures métalliques (HM) et les lampes fluorescentes. Les lampes à incandescence ont été les premiers types de source de lumière artificielle à être utilisées dans l'horticulture. Cependant, ces lampes ont une faible efficacité énergétique. En effet, le PAR des lampes à incandescence ne représente que 15 % de l'énergie électrique consommée. Près de 85 % de l'énergie électrique consommée

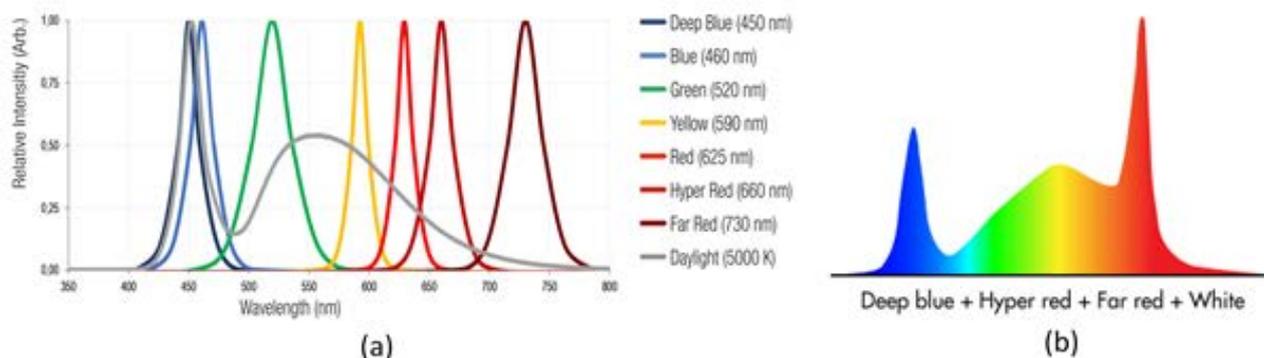


Figure 3 : Spectres de LEDs pour éclairage horticole (a) spectres monochromatiques – Source : <https://www.digikey.fr/> (b) association de LEDs Source : <https://www.ledil.com/>

mière, les lumières rouges et bleues sont plus efficaces pour augmenter respectivement le sucre soluble et les niveaux de protéines solubles dans les légumes produits en milieux contrôlés.

Concernant les pigments tels les caroténoïdes, même si les concentrations peuvent varier selon les espèces de plante, les spectres rouges, bleus et UV-B ont des effets plus importants, favorisant la synthèse et l'accumulation de caroténoïdes dans les légumes.

Une intensité lumineuse optimale favorise également la photosynthèse et l'accumulation de matière sèche et de composés phytochimiques, alors qu'une irradiation en excès ou inadaptée peut inhiber ces processus. Les photoréponses, la synthèse et l'accumulation de

“les LEDs permettent également de réduire le coût énergétique avec un éclairage intermittent à haute fréquence sans impact ni sur la durée de vie de la source d'éclairage, ni sur l'efficacité photosynthétique.”

vant la source de lumière utilisée : les serres, qui utilisent la lumière solaire comme source principale de lumière et les usines de plantes, qui utilisent des sources de lumière artificielle. Dans les deux cas, la lumière joue un rôle important dans la culture protégée.

Il existe plusieurs lampes horticoles suivant la technologie de génération

est perdue car dissipée sous forme de chaleur. Les lampes fluorescentes, quant à elles, ne favorisent pas la floraison car elles ne fournissent pas la lumière dans le spectre rouge lointain. De plus, l'efficacité énergétique des lampes fluorescentes est relativement faible. Actuellement, les lampes HPS restent largement utilisées comme sources de lumière en horticulture en raison de



David Buso

est enseignant-chercheur à l'université Paul Sabatier. Il travaille sur la technologie de nouvelles sources de lumières et à leurs utilisations dans des applications non éclairagistes. Il travaille notamment sur la culture de microalgues en photobioréacteur depuis plusieurs années. Il s'intéresse plus particulièrement aux interactions lumières microalgues au travers de projets collaboratifs (public/privé) qui ont abouti à une dizaine de publications dans le domaine.



Urbain Niangoran

est enseignant-chercheur à l'université Nangui Abrogoua (Abidjan). Il est ingénieur en électronique de l'INP-HB de Yamoussoukro et docteur en photonique et systèmes optoélectroniques de l'université de Toulouse 3. Ces activités de recherches notamment au sein de l'équipe Lumière et matière au laboratoire LAPLACE portent sur la modélisation et l'optimisation de systèmes d'éclairage à LED pour applications (impacts énergétique, photosynthétique et nutritionnel) en algoculture.

leur durée de vie et de leur efficacité énergétique. Cependant, seulement 30% de l'électricité consommée par les lampes HPS sont convertis en lumière efficace pour la croissance de la plante cependant que 70 % sont perdus sous forme de chaleur. Les lampes MH ont un spectre large mais accentué dans le bleu ce qui ne favorise pas la floraison contrairement aux lampes HPS. Cependant, comparativement aux lampes à incandescence et aux lampes HPS, le spectre des lampes MH est plus adapté à la croissance des plantes, mais ces lampes ont une efficacité énergétique faible (environ 24 %). Les technologies des lampes fluorescentes, MH et HPS ne permettent pas de faire varier l'intensité de la lumière. Il est donc impossible d'adapter la quantité de lumière qu'elles fournissent en fonction des besoins de la plante dans le temps. Ainsi, ces technologies ne favorisent pas l'automatisation de l'éclairage dans les serres horticoles. En raison des exigences d'efficacité énergétique, de croissance et de synthèse de composés phytochimiques des plantes, l'adoption de nouvelles sources lumineuses est nécessaire pour l'éclairage horticole en environnement contrôlé.

Les diodes électroluminescentes constituent une source de lumière alternative. La première LED a été inventée en 1964 mais les LED n'ont été utilisées dans la recherche sur l'éclairage des plantes que dans les années 1980. Cependant, elles se démocratisent de plus en plus par rapport aux autres technologies d'éclairage traditionnelles. Leur longue durée de vie, leur effica-

cité énergétique élevée, leur taille et leur flexibilité sont les moteurs de cette expansion et favorisent leur utilisation dans une large variété d'applications et notamment dans le domaine de l'éclairage horticole (**figure 2**). Ainsi, la technologie LED permet le développement des usines de plantes grâce notamment à leur petite taille et à leur robustesse. Pour la croissance des plantes, les LED présentent trois avantages majeurs : une intensité variable, une grande variété de lumière monochromatique (ce qui permet de faire des combinaisons de spectre et donc fournir le spectre adapté) (**figure 3**) ainsi qu'une grande efficacité photosynthétique.

Par ailleurs, les systèmes à base de LED produisent moins de chaleur, ce qui permet de les rapprocher des plantes (souvent dans les feuillages) favorisant ainsi une bonne répartition de la lumière (**figure 2**).

Le marché des systèmes d'éclairage horticole à LED

Les systèmes d'éclairage à LED évoluent constamment en grande partie en raison des besoins et exigences du secteur de l'éclairage général des humains. En effet, beaucoup des besoins de l'éclairage horticole sont similaires à ceux de l'éclairage destiné à l'homme (efficacité énergétique, fiabilité, contrôle numérique...). La technologie d'éclairage à LED pour l'horticulture gagne du terrain sur le marché en raison de ses nombreux avantages, notamment sa faible consommation énergétique par rapport aux technologies existantes, réduisant ainsi les coûts d'exploitation. Le déve-

“Pour la croissance des plantes, les LED présentent trois avantages majeurs : une intensité variable, une grande variété de lumière monochromatique (ce qui permet de faire des combinaisons de spectre et donc fournir le spectre adapté) ainsi qu'une grande efficacité photosynthétique.”

veloppement du marché de l'éclairage horticole est principalement dû aux applications de serre et des usines de plantes surtout en milieu urbain. L'agriculture urbaine représente une solution potentielle pour faire face à la rareté des terres arables et répondre aux besoins alimentaires des consommateurs.

l'augmentation des volumes de production des produits agricoles tels que les légumes et les fruits. Parmi les systèmes d'éclairage horticole, les LED présentent de nombreux avantages pour la croissance des plantes tant sur le plan de l'efficacité énergétique que photosynthétique. De plus, avec leur longue

“L'agriculture urbaine représente une solution potentielle pour faire face à la rareté des terres arables et répondre aux besoins alimentaires des consommateurs.”

L'éclairage à LED est également un facteur important dans le développement de l'agriculture verticale. Cette technique agricole contribue entre autres à la dépollution de l'air dans les zones urbaines par l'absorption du CO₂ dans le processus de la photosynthèse.

En ce qui concerne l'industrie de l'éclairage horticole à LED, les cinq principaux fabricants (notamment Philips, Osram et General Electric) occupent près de 42 % du marché (chiffres de 2016). Philips, avec une part de marché de près de 13 % (2016), est le leader du secteur. L'Europe est la plus grande région de vente de lampes LED horticoles, avec un chiffre d'environ 1 163 000 unités et une part de marché de 32,24 % (2016). L'Amérique du Nord suit avec environ 1 116 000 unités. Selon une étude menée par Value Market Research, le marché mondial de l'éclairage à LED pour l'horticulture est évalué à 868 milliards USD (en termes de revenus) en 2018 et devrait atteindre 3 912 milliards USD d'ici 2025 avec un taux de croissance annuel moyen de 24 %.

Conclusion

L'utilisation de l'éclairage artificiel en horticulture en environnement contrôlé pour la croissance des plantes offre de grandes opportunités autant sur le plan économique ou énergétique que pour

durée de vie, elles sont à même d'assurer une rentabilité économique aux producteurs. Avec leur gamme variée de spectres monochromatiques, les LED offrent également de nombreuses possibilités dans la recherche avec notamment des thématiques concernant l'influence du spectre visible, des UV et des infrarouges sur la croissance, la synthèse et l'accumulation de produits phytochimiques au niveau des plantes. Ces applications doivent permettre d'obtenir des produits à forte valeur nutritionnelle contribuant ainsi à la lutte contre la malnutrition. Par ailleurs, le développement des usines de plantes et de l'agriculture verticale grâce aux LED permettra de lutter non seulement contre l'insécurité alimentaire et la pollution de l'air mais également de préserver les terres cultivables. ■

Urbain Niangoran^{1,2}

David Buso¹

Laurent Canale¹

Georges Zissis¹

¹Laboratoire plasma et conversion d'énergie (LAPLACE), université de Toulouse III, France

²Laboratoire de physique fondamentale et appliquée (LPFA), Abidjan, Côte d'Ivoire



Georges Zissis

est professeur UPS au département EEA de la FSI et chercheur au laboratoire Laplace, responsable du groupe de recherche Lumière et Matière. Il a été président de la 63e section du Conseil national des universités (2015-19) et est actuellement membre du COMEVAL (ministère de la transition écologique et solidaire). Il est président de l'IEEE Industry Applications Society (2019-20) et a reçu le 1^{er} prix de l'IEC Centenary Challenge. Il est docteur Honoris Causa de l'université de Saint-Petersbourg. George Zissis est membre émérite de la SEE,

Résumé

L'horticulture en milieux contrôlés est une alternative pour répondre aux besoins alimentaires croissants de la population. Pour la croissance des plantes dans ces environnements, un éclairage artificiel est nécessaire. Cet éclairage doit être adapté à la plante c'est-à-dire un éclairage qui a un spectre approprié. La technologie LED, quoique récente parmi les technologies horticoles, possède une part de marché considérable et en croissance constante. En plus de sa variété de gamme spectrale monochromatique adaptée à la photosynthèse et à l'accumulation de composés phytochimiques, elle offre une efficacité énergétique élevée. L'éclairage horticole est un secteur industriel prometteur, avec la fabrication de LED ou de lampes horticoles, la distribution, les accessoires, le conseil et d'autres activités diversifiées et en croissance. Le marché est dominé par l'Europe et l'Amérique du Nord. En 2018, le marché mondial de l'éclairage horticole LED a été évalué en termes de chiffre d'affaires à 868 milliards de dollars. Ce marché devrait atteindre 3 912 milliards de dollars d'ici 2025 avec un taux de croissance annuel moyen de 24 %.

Abstract

Horticulture in controlled environments is an alternative to meet the growing food needs of population. For plants growth in these environments, artificial lighting is necessary. This lighting must be adapted to plant i.e. a lighting that has a suitable spectrum. LED technology, although recent in horticultural lighting, has a considerable market share and steadily growing. Moreover, in addition to its variety of monochromatic spectral range suitable for photosynthesis and phytochemical compounds accumulation, it has a high energy efficiency. Horticultural lighting is a promising sector with LED manufacturing industries or horticultural lamp, distribution, fittings, consulting and others that are diversified and growing. The market is dominated by Europe and North America. Finally, in 2018, global market for LED horticultural lighting was valued in terms of revenues at 868 billion USD. This market is expected to reach 3912 billion USD by 2025 with an average annual growth rate of 24%.



© Ash Pollard / Shutterstock

Bibliographie

- [1] R. C. Morrow, « LED lighting in horticulture », *HortScience*, vol. 43, no 7, p. 1947–1950, 2008.
- [2] M. Olle et A. Viršile, « The effects of light-emitting diode lighting on greenhouse plant growth and quality », *Agric. Food Sci.*, vol. 22, no 2, p. 223–234, 2013.
- [3] Z. H. Bian, Q. C. Yang, et W. K. Liu, « Effects of light quality on the accumulation of phytochemicals in vegetables produced in controlled environments: a review: Effects of light on vegetable phytochemicals », *J. Sci. Food Agric.*, vol. 95, no 5, p. 869–877, mars 2015.
- [4] J. K. Holopainen, M. Kivimäenpää, et R. Julkunen-Tiitto, « New Light for Phytochemicals », *Trends Biotechnol.*, vol. 36, no 1, p. 7–10, janv. 2018.



Les courants porteurs en ligne

Dans l'économie des réseaux de télécommunications, le partage des infrastructures par plusieurs services ou fonctions peut être un facteur puissant de réduction des coûts. C'est pourquoi les concepteurs de réseaux essaient, quand c'est possible, d'utiliser des infrastructures de transport préexistantes pour mettre en œuvre de nouvelles offres de service. Cela a été, par exemple, le cas pour le démarrage de l'accès à haut débit où les techniques DSL ont permis de déployer très rapidement sur la quasi-totalité du territoire ce type d'accès en utilisant la bande haute des lignes téléphoniques de cuivre laissée libre par le service téléphonique traditionnel, sans attendre la mise en œuvre d'un raccordement par fibre.

La technique des courants porteurs en ligne (CPL, en anglais Power Line Carrier), objet de ce dossier, vise un objectif voisin mais en s'appuyant sur une infrastructure qui n'avait pas du tout été conçue pour servir de support aux télécommunications, le réseau électrique. Elle est aujourd'hui utilisée dans les locaux d'habitation ou dans des locaux professionnels de petite taille pour les doter d'un réseau local de données, comme peut aussi le faire le Wi-Fi, permettant ainsi de tirer facilement profit de la croissance des débits de raccordement permis par DSL et la fibre.

Elle l'est également dans le réseau de distribution électrique pour la télérelève des compteurs électriques Linky qui sont, à l'heure actuelle, en cours de déploiement. Dans le premier cas il s'agit d'un service local mis en œuvre par le client final qui s'équipe avec des adaptateurs CPL qu'on peut acheter dans les grandes surfaces. Dans le second, il s'agit d'un déploiement coordonné à l'échelle du réseau de distribution électrique nécessitant non seulement l'installation d'un nouveau compteur mais aussi le déploiement de concentrateurs de données dans les sites accueillant des transformateurs MT-BT du réseau électrique.

Un troisième usage du CPL a beaucoup été discuté dans le cadre de l'ouverture de la concurrence sur les réseaux de télécommunications à la fin des années 1990 : il s'agissait d'utiliser le réseau de distribution électrique comme réseau d'accès à Internet à haut débit en utilisant les CPL pour concurrencer l'accès filaire de l'opérateur historique. Finalement l'imposition par le régulateur français du dégroupage de la ligne de cuivre et de l'obligation d'héberger les équipements des concurrents de l'opérateur historique dans ses locaux, ont eu raison de cet usage potentiel de CPL qui ne



- semble pas avoir eu plus de succès dans le reste du monde.

Plusieurs systèmes CPL ont été définis au fil des années en fonction de l'évolution des usages et des besoins en débit et ont fait l'objet d'une normalisation internationale. La caractérisation des réseaux de distribution électrique en termes de propagation des signaux a été un élément très important dans les progrès des systèmes CPL dont les plus performants permettent aujourd'hui de transporter des débits de l'ordre de la centaine de Mbit/s. Dans le premier article de ce dossier, Les communications sur les réseaux électriques, **Pascal Pagani** présente les principes des CPL, quelques résultats essentiels des travaux de caractérisation du canal de transmission et les différentes normes en matière de CPL.

L'amélioration des performances de CPL est toujours un objectif pour l'industrie, notamment pour en augmenter la portée et également le débit. En particulier la couverture d'immeubles hébergeant des entreprises est un objectif important notamment pour faciliter le déploiement indoor de l'Internet des objets (IoT). **Hisao Koga** et **Jean-Philippe Faure** décrivent dans le deuxième article, HD-PLC broadband power line communication for IoT, une nouvelle version des spécifications de HD-PLC, récemment approuvée par l'IEEE, incluant un mécanisme permettant d'augmenter sa portée en réduisant la bande de fréquences utilisée ou d'en augmenter le débit en élargissant la bande utilisée pour pouvoir atteindre des débits de l'ordre du Gbit/s.

Le réseau CPL qui collecte les données de comptage dans le cadre du déploiement des compteurs Linky, sera très probablement le plus grand réseau CPL en France. Il constitue la première étape d'installation d'un réseau électrique intelligent couvrant le segment basse tension. Dans l'article Les courants porteurs en ligne (CPL) au service des réseaux électriques intelligents, **Cédric Lavenu** et **Cédric Chauvenet** décrivent l'architecture et les protocoles de communication retenus pour le réseau de collecte des compteurs Linky : sa mise en œuvre offrira en plus de la lecture des compteurs



L'auteur

Patrice Collet est ancien élève de l'Ecole polytechnique et ingénieur général honoraire des télécommunications. Sa carrière l'a conduit de la recherche et développement au CNET qui était le centre de recherches de la Direction générale des télécommunications à la Direction générale de France Télécom où il a eu la responsabilité de l'architecture du réseau fixe et de son évolution.

un certain nombre de fonctions d'aide à la gestion du réseau. Ils décrivent également le test de l'utilisation de CPL dans le réseau moyenne tension, test qui n'a pas donné lieu à déploiement.

Le CPL peut être une solution au transport sur une même infrastructure passive de l'énergie et de données, mais ce n'est pas la seule. Dans le monde des réseaux locaux de données, une problématique

analogue a été traitée : comment éviter d'avoir à installer deux câbles, un câble Ethernet et un câble d'alimentation secteur, pour raccorder un périphérique comme une imprimante ou une caméra ou un téléphone IP ? PoE (Power over Ethernet) a été défini par l'IEEE pour apporter une solution à cette question. L'hypothèse de départ est l'existence d'un câble Ethernet entre le périphérique et un nœud de réseau, câble sur lequel sera injectée une tension continue à 48 V. Le câble Ethernet standard comporte quatre paires torsadées qui selon les débits Ethernet requis et les différentes versions de la norme peuvent être utilisées directement ou indirectement pour porter la télé-alimentation : les puissances disponibles pour les périphériques varient, suivant les versions de PoE, mais se sont progressivement accrues au fil des versions successives de la norme. La dernière version (2018), l'IEEE 802.3bt appelée « 4PPoE », supporte, pour le type 3, une puissance de 60 W et, pour le type 4, une puissance de 90 W, puissances compatibles avec des applications du type éclairage, contrôle d'accès, vidéophones, clients légers informatiques. Comme cette technique impose l'existence d'un câblage Ethernet, son usage est aujourd'hui limité aux locaux ainsi câblés ou aux lieux où l'alimentation secteur n'est pas facilement accessible. Elle peut aujourd'hui dans certaines circonstances être un concurrent des techniques CPL : avec le précâblage Ethernet qui s'étend, notamment, dans les appartements neufs, le champ de la concurrence avec CPL pourrait à l'avenir s'étendre et évidemment réduire le champ d'usage de CPL. Mais le CPL aura de son côté probablement fait de nouveaux progrès... ■

Les articles

Les communications sur les réseaux électriques

Principes de transmission et applications.....p.71

HD-PLC broadband power line communications for IoT.....p.81

Les courants porteurs en ligne (CPL) au service des réseaux électriques intelligents

Mise en œuvre d'une solution industrielle : défis et opportunités.....p.90



L'auteur

Pascal Pagani est diplômé de Telecom Bretagne et de l'université de Bristol. Il a obtenu un doctorat en électronique à l'INSA de Rennes en 2005 et une HDR de l'université de Bretagne Occidentale en 2016. De 2002 à 2012, il a mené des travaux de recherche au sein d'Orange Labs dans les domaines de la transmission pour les réseaux résidentiels, qui ont été récompensés par le Grand prix de l'électronique Général Ferrié 2013. De 2012 à 2016, il a été maître de conférences dans le département micro-ondes de Telecom Bretagne. Aujourd'hui, il travaille au CEA-CESTA où il se spécialise dans le domaine de l'interaction onde-matière pour l'étude de la surface équivalente radar.

smart cities. Ils sont aujourd'hui une réalité. Cependant, le réseau électrique n'a pas été initialement conçu pour la transmission de signaux à haute fréquence et constitue un environnement de communication difficile. La transmission sur des dizaines de mètres de câbles de cuivre conduit à une forte atténuation et la topologie du réseau génère des trajets de propagation multiples, sources d'évanouissements sélectifs en fréquence. De plus, les différents types de bruit électro-

Bandes de fréquences

Le **tableau 1** présente les différents types de technologies CPL. La technologie Ultra Narrow Band (UNB) correspond aux premiers systèmes de télérelevé offrant un très faible débit, telles que RCS, Turtle et TWACS. Ces technologies sont aujourd'hui peu utilisées, et les développements actuels se concentrent sur deux autres types de systèmes CPL :

“Les systèmes CPL sont fiables pour le réseau local domestique, la télévision par protocole IP et les réseaux de distribution intelligents comme les *smart grids* et les *smart cities*.”

magnétique observés sur le réseau électrique peuvent corrompre les données transmises. Enfin, les caractéristiques du canal varient d'un segment du réseau à un autre et fluctuent en fonction de l'impédance des dispositifs connectés au réseau.

Dans cet article, nous présentons les bandes de fréquences utilisées par les systèmes CPL, ainsi que les diverses topologies de réseaux électriques rencontrées. Les caractéristiques de l'environnement de propagation, en termes de canal et de bruit, sont discutées. Nous décrivons ensuite les applications actuelles et envisagées des systèmes CPL. Enfin, un panorama des différentes normes et spécifications CPL existantes est dressé.

- les systèmes à bande étroite, ou Narrow Band (NB), qui utilisent des fréquences de 3 à 500 kHz, offrent des débits suffisants pour la gestion du réseau électrique intelligent dans le domaine de la distribution ;

- les systèmes à large bande, ou Broad Band (BB), qui utilisent des fréquences de 1,8 à 86 MHz, permettent d'établir une infrastructure haut débit pour le réseau local domestique.

La **figure 1** représente le principe de superposition des signaux de communication CPL au courant alternatif. L'énergie électrique est transportée en utilisant un courant alternatif d'une fréquence de propagation des signaux électromagnétiques dans les câbles, de l'ordre de

Type	Bandes de fréquence	Débits	Applications
Ultra Narrow Band	0,3 – 3,0 kHz	1 à 10 bit/s	Télérelevé, détection de surcharge
Narrow Band	3,0 - 500 kHz	500 kbit/s	Smart grids, paiement personnalisé
Broad Band	1,8 - 86 MHz	200 Mbit/s	Réseau local domestique

Tableau 1 : Les différents types de technologies CPL.

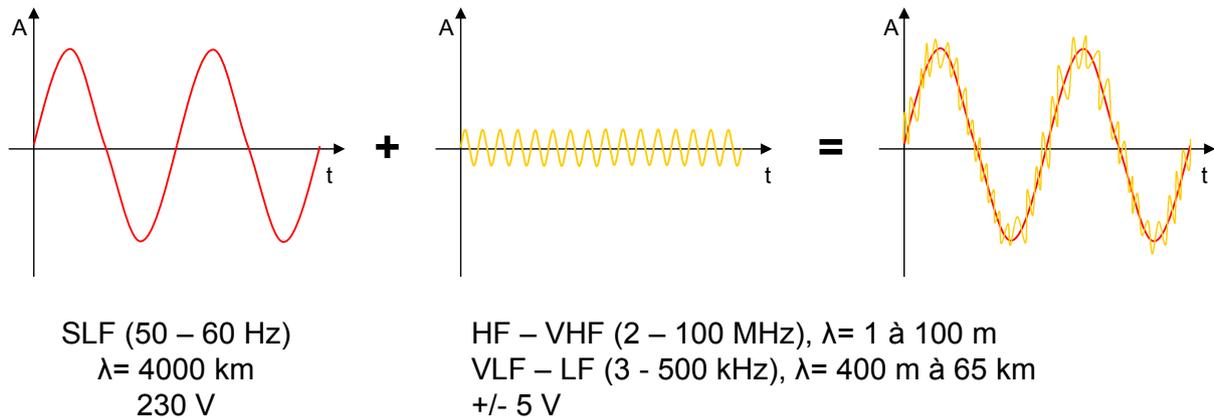


Figure 1 : Superposition du courant alternatif du secteur et des signaux de communication CPL.

$2 \times 10^8 \text{ m.s}^{-1}$, la longueur d'onde de ces signaux est de l'ordre de 4 000 km. A un instant donné, la phase du secteur est donc la même en tout point du réseau électrique. Les signaux de communication, pour la technologie CPL-NB, occupent les bandes de fréquences des gammes Very Low Frequency et Low Frequency. De la même manière, les systèmes CPL-BB utilisent principalement le spectre dans la gamme High Frequency. Pour ces systèmes, les longueurs d'onde correspondantes varient respectivement de 400 m à 65 km (CPL-NB) et de 1 à 100 m (CPL-BB). Ces longueurs d'onde sont de l'ordre de grandeur des dimensions des réseaux électriques supports de la transmission. Dès lors, la propagation par trajets multiples engendre des déphasages importants, provoquant des phénomènes d'évanouissement rapide similaires à ceux rencontrés dans les canaux radio. Il est donc important de caractériser l'environnement de propagation et son effet sur la transmission afin de dimensionner les systèmes de communication CPL.

Topologies du réseau électrique et couplage au canal

Les différents types de réseaux électriques

Le réseau électrique est composé de différents types de lignes, présentant des tensions différentes suivant leur emplacement dans le réseau :

Le réseau de transport (appelé HTB en France) est constitué de lignes HT de 50 kV à 400 kV, et est utilisé pour la distribution électrique à l'échelle nationale ou internationale. Il comporte de longues lignes aériennes avec peu ou pas de branches. Ceci lui confère de bonnes propriétés de guide d'onde. Cependant, ce réseau n'est généralement pas utilisé pour la communication à haut débit, car les lignes HT sont sujettes à des phénomènes transitoires de formation d'arc (effet Corona) qui perturbent les transmissions.

Le réseau de distribution à BT transporte des tensions variant selon les pays : 230 V sur la plaque européenne, 110 V aux Etats-Unis, parfois à 400 V. Il est connecté aux lignes MT par des transformateurs secondaires (appelés transformateurs HTA-BT en France). La ligne BT assure la distribution électrique vers les consommateurs domestiques ou industriels. Ce réseau est généralement constitué d'un grand nombre de branches. La **figure 2** présente la partie BT du réseau de distribution en France. L'énergie est fournie selon trois phases, desservant généra-

“L'utilisation de la technologie CPL à l'intérieur des véhicules fait l'objet d'un intérêt grandissant. Des études ont été réalisées pour la transmission de données à l'intérieur de différents types de véhicules, par exemple dans les voitures et les avions.”

Le réseau de distribution à MT (appelé HTA en France) comporte des lignes de 1 kV à 50 kV. Connecté au réseau HT par les transformateurs primaires, il permet la distribution électrique vers les agglomérations ou vers certains sites industriels. Les lignes sont aériennes ou enterrées avec un nombre de branches limité. La technologie CPL est utilisée sur cette partie du réseau pour la commande et le contrôle d'équipements, tels que les sectionneurs et les ré-enclencheurs de lignes.

lement des clients différents, mais une distribution tri-phasée est également possible. Le conducteur de retour, appelé fil de neutre (N), est connecté à la masse au niveau du transformateur HTA-BT.

Le réseau domestique à BT distribue l'énergie à l'intérieur des bâtiments. Des différences importantes peuvent exister en fonction du pays et du type de bâtiment (maisons, immeubles et sites industriels). En général, le réseau exté-

rieur est connecté à un compteur et à un disjoncteur général, puis à un tableau de distribution contenant des disjoncteurs secondaires. Les lignes BT sont ensuite disposées en arbre ou en étoile jusqu'aux différentes prises. Les nombreuses branches du réseau domestique sont responsables des trajets multiples

teur électrique situé en entrée de chaque réseau domestique. Il en résulte un effet d'isolation pour les signaux conduits entre les réseaux domestiques de différentes habitations.

Pour compléter ce tour d'horizon des topologies du réseau électrique, notons

au réseau électrique, il est nécessaire de disposer de coupleurs permettant à la fois de transmettre le signal et de protéger l'équipement. Il existe deux types de coupleurs :

- les *coupleurs capacitifs* connectent physiquement le modem aux câbles de la ligne électrique par l'intermédiaire de condensateurs à haute tension. Ce mécanisme permet un contrôle direct de la tension injectée ou reçue sur la ligne électrique. Afin d'assurer une isolation galvanique, un transformateur est parfois ajouté en amont du dispositif. Ce type de coupleur est le plus souvent utilisé pour les réseaux BT ;

- les *coupleurs inductifs* utilisent des anneaux de ferrite pour associer le courant transmis sur le réseau électrique au circuit d'entrée du modem, ce qui évite la connexion directe entre le modem et le réseau de puissance. Dans ce cas, la tension injectée ou reçue est déduite du courant mesuré et dépend de l'impédance de la ligne. Les coupleurs inductifs sont fréquemment utilisés pour les réseaux MT et HT.

“Une transmission CPL classique utilise deux câbles électriques pour réaliser une transmission différentielle. Dans le réseau domestique, il est possible d'utiliser les trois câbles disponibles, la phase (P), le neutre (N) et la terre (T), de manière à former un canal multi-capteurs.”

qui affectent la propagation. Notons également qu'en plus des fils de phase (P) et de neutre (N), un conducteur de terre (T) est présent sur la plupart des prises de l'installation, pour assurer la sécurité des usagers en cas de défaut électrique des appareils. Ce connecteur de terre est relié à la masse au pied du bâtiment.

Il faut noter que certains éléments du réseau atténuent fortement le signal transmis. C'est le cas, par exemple, du comp-

que l'utilisation de la technologie CPL à l'intérieur des véhicules fait l'objet d'un intérêt grandissant. Des études ont été réalisées pour la transmission de données à l'intérieur de différents types de véhicules, par exemple dans les voitures [2] et les avions [3].

Méthodes de couplage et types de canaux

Afin de connecter les modems CPL, ou tout équipement de mesure du canal,

Une transmission CPL classique utilise deux câbles électriques pour réaliser une transmission différentielle. Dans le réseau domestique, il est possible d'utiliser les trois câbles disponibles, la phase (P), le neutre (N) et la terre (T), de manière à former un canal multi-capteurs. La **figure 3** illustre ce concept et présente les différents modes de transmission et de réception. Au niveau de l'émetteur, la loi de Kirchhoff limite à deux le nombre de signaux différentiels simultanés (ports d'émission 1 et 2). A la réception, les trois signaux différentiels peuvent être exploités (ports de réception 1, 2 et 3). De plus, les asymétries du réseau génèrent un signal de mode commun, qui peut être exploité en réception, par exemple en utilisant une boucle de courant (port de réception 4). Pour une transmission donnée, le canal de propagation s'exprime donc sous la forme d'une matrice 2×4 . Cette technique de transmission, appelée Multiple-Input Multiple-Output (MIMO), a été proposée pour

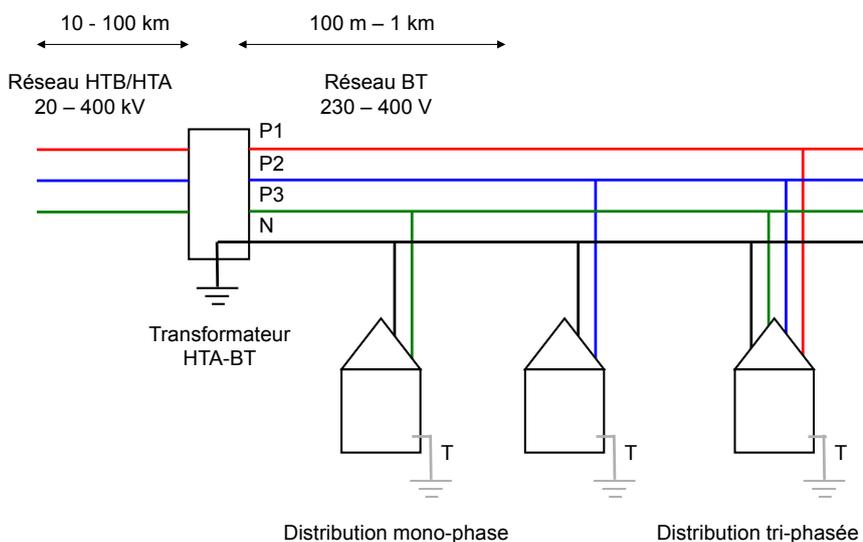


Figure 2 : Le réseau de distribution électrique en France.

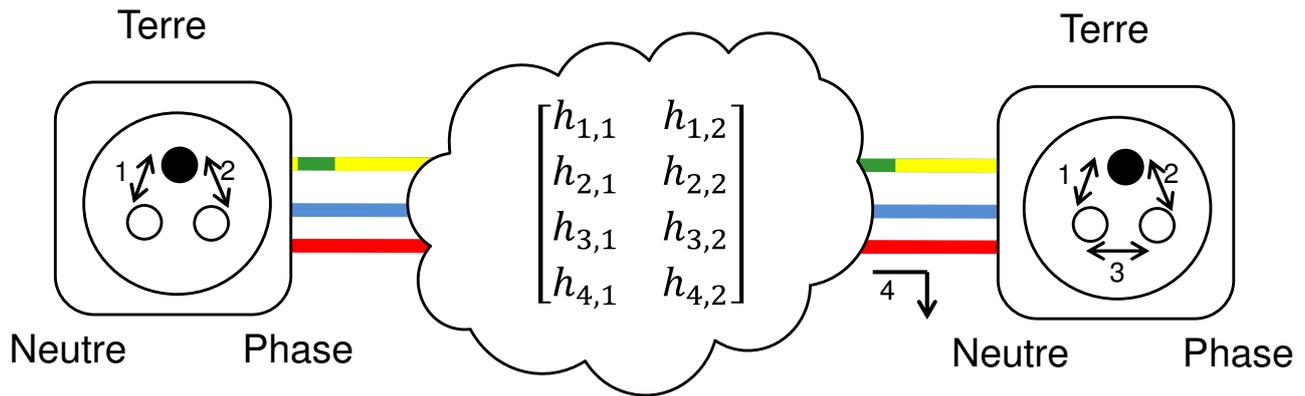


Figure 3 : Illustration de la transmission CPL MIMO sur un réseau électrique domestique.

la première fois pour les réseaux résidentiels dans [4]. Mise en œuvre dans les standards les plus récents, elle a permis d'accéder à des débits très importants, de l'ordre de 2 Gbit/s [5].

Environnement de propagation

Le réseau électrique constitue un environnement difficile pour les communications numériques. En effet, la propagation du signal sur les câbles de cuivre entraîne une forte atténuation qui croît avec la distance et la fréquence, ainsi que l'apparition de trajets multiples. Par ailleurs, les appareils électriques connectés au réseau sont la source d'un bruit électromagnétique important sur l'ensemble du spectre, avec une forme impulsive dans le domaine temporel qui peut corrompre les données transmises.

Caractéristiques du canal

Le signal CPL transmis sur le réseau électrique se propage de l'émetteur au récepteur en suivant les branches du réseau. De nombreux trajets de propagation existent, car les inhomogénéités présentes à chaque nœud de connexion et aux terminaisons du réseau provoquent des réflexions. L'amplitude et la phase du signal réfléchi dépendent de l'impédance des charges connectées ou du segment suivant du réseau électrique. Ainsi, la réponse impulsionnelle (RI) du canal est composée d'un grand nombre de trajets multiples, de la même manière que pour les canaux de propagation radioélectriques.

Une manière complémentaire d'appréhender le canal de propagation CPL est d'étudier la fonction de transfert $H(f)$ dans le domaine fréquentiel. La fonction de transfert $H(f)$ et la RI du canal sont liées par une simple transformation de Fourier. Un exemple de fonction de transfert mesurée est donné dans la figure 4. On observe que la présence de trajets multiples conduit à une forte sélectivité en fréquence, due à la recombinaison en phase ou en opposition de phase des composantes du signal. Une autre caractéristique visible sur cette figure est la forte atténuation en fonction de la fréquence, due à la propagation du signal sur les câbles de cuivre.

Une particularité du canal de propagation CPL par rapport à son homologue

sans fil réside dans les importantes variations temporelles qui peuvent être observées, notamment lorsque des charges ou des parties du réseau sont connectées ou déconnectées. De plus, l'impédance des charges connectées au réseau varie de manière cyclique avec la fréquence de 50 Hz du secteur. Ainsi, le canal de propagation présente une variation cyclo-stationnaire, qui a été étudiée dans [6].

Caractéristiques du bruit électromagnétique

Contrairement à de nombreux autres canaux de communication, le bruit présent sur un canal CPL ne peut pas être décrit par un modèle de bruit blanc gaussien ●●●

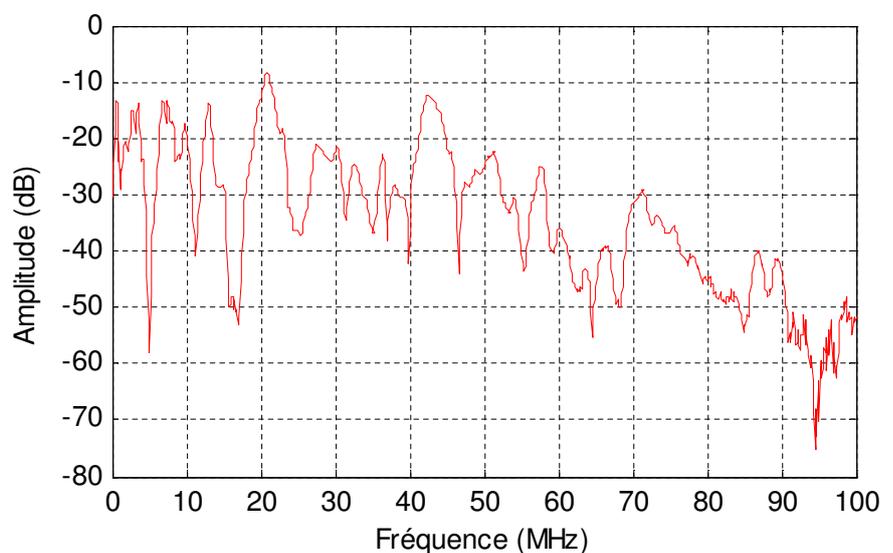


Figure 4 : Exemple de mesure de la fonction de transfert du canal CPL.

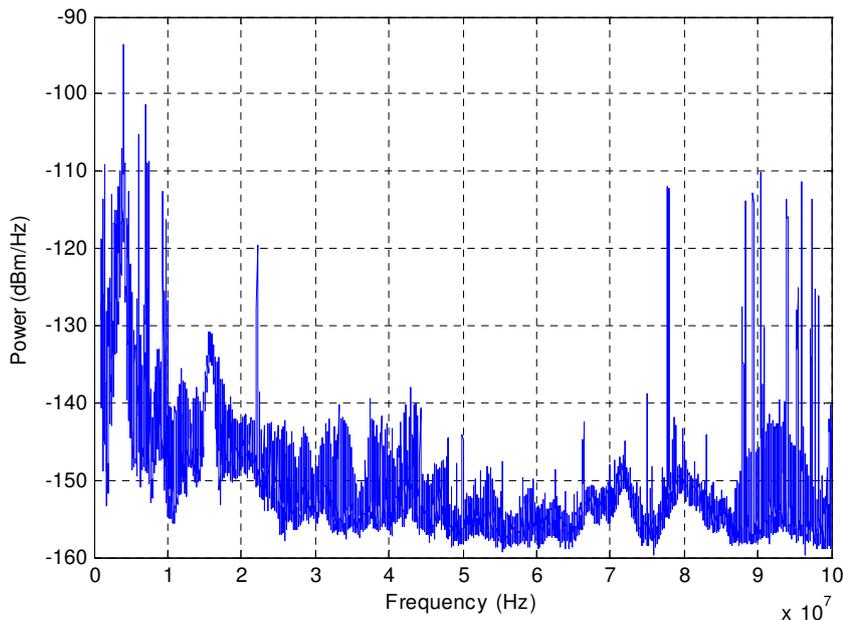


Figure 5 : Exemple de bruit de fond CPL mesuré [102].

“Contrairement à de nombreux autres canaux de communication, le bruit présent sur un canal CPL ne peut pas être décrit par un modèle de bruit blanc gaussien additif.”

additif. Traditionnellement, le bruit observé dans les réseaux électriques domestiques a été divisé en plusieurs catégories, suivant son origine, son niveau et sa signature dans le domaine temporel [7].

Une première catégorie est composée du bruit impulsif engendré par les appareils électroniques connectés au secteur, comme les alimentations à découpage. Ce type de bruit est de courte durée (quelques μs) mais d'un niveau de tension relativement élevé de l'ordre de dizaines de mV à quelques V. Ce bruit répétitif peut être synchrone ou non avec la période du secteur.

Une seconde catégorie regroupe le bruit à bande étroite. Ce type de signal correspond en général à des sources d'émission de radiodiffusion, provenant généralement des bandes de fréquences à ondes courtes (OC) et à modulation de fréquence (FM), et captées par les câbles du réseau électrique. D'autres sources de

bruit proviennent d'équipements électriques ou industriels à proximité du réseau considéré. Ce type de bruit produit des interférences fortes sur de longues durées, dans une bande de fréquences relativement étroite de l'ordre d'une dizaine de kHz.

Enfin, les sources de bruit restantes, qui présentent un niveau d'interférence plus faible, forment une troisième catégorie, appelée bruit de fond. Comme le montre la **figure 5**, le bruit de fond est généralement coloré, avec un niveau relativement faible, de l'ordre de -150 dBm/Hz pour les fréquences élevées. On observe également la présence de bruit à bande étroite, notamment dans la bande FM au-dessus de 87 MHz.

Un élément important relatif à l'ensemble des catégories de bruit est leur dépendance avec le temps. Une étude approfondie des variations temporelles du bruit en contexte CPL est présentée dans [8].

Applications

Les différentes parties du réseau électrique permettent d'envisager diverses applications de communication CPL :

- Dans le milieu résidentiel, la technologie CPL est principalement utilisée pour la constitution d'un *réseau domestique haut débit*, en complément des autres technologies disponibles, comme le Wi-Fi ou la fibre optique. Aujourd'hui les modems se présentent sous forme de boîtiers indépendants, offrant des débits de communication variant de quelques dizaines de Mbit/s jusqu'à 2 Gbit/s (**photo 1**). Cette application requiert



Photo 1 : Adaptateurs CPL HomePlug AV assurant un débit allant jusqu'à 600 Mbit/s.



Photo 2 : Adaptateur CPL sur rail DIN permettant à chaque prise du bâtiment de devenir une prise réseau potentielle. Vitesse de transfert allant jusqu'à 1,2 Gbit/s – Source : Devolo.

une très grande qualité de service, ainsi qu'un niveau de sécurité élevé, en raison du couplage possible entre les réseaux électriques du voisinage.

- Les réseaux de domotique sont une autre application du CPL à l'intérieur des bâtiments. Ils consistent à mettre en réseau différents types de capteurs (présence, température, etc.) pour la surveillance ou l'automatisme au domicile. Ce type d'application demande un débit faible de quelques dizaines de kbit/s, mais une fiabilité élevée et une faible consommation électrique, étant donné le nombre de capteurs potentiellement mis en œuvre.

Les systèmes de ce type sont actuellement en passe d'être remplacés par des systèmes à haut débit qui offrent des performances très supérieures pour un prix équivalent (photo 2).

- L'application principale pour les réseaux à l'extérieur des bâtiments est le développement de réseaux électriques intelligents ou smart grids. Elle consiste à faciliter la gestion du réseau par la transmission de données sur les lignes de distribution, notamment sur la partie BT. Les opérateurs de réseaux d'énergie mettent actuellement en place des compteurs intelligents, permettant la télé-relève vers un concentrateur situé au niveau du transformateur HTA-BT (figure 6).

Le smart grid vise également une meilleure intégration des sources d'énergie distribuées et variables, comme les panneaux photovoltaïques ou les éoliennes. Enfin, plusieurs administrations locales investissent dans la technologie CPL, par exemple pour la gestion du parc d'éclairage public. Ainsi le CPL contribue au développement de villes intelligentes ou smart cities. Dans ces contextes, les débits demandés restent faibles (quelques dizaines de kbit/s), mais les distances importantes et le grand nombre de capteurs potentiels nécessitent une grande robustesse du système.

- Enfin, l'utilisation de la technologie CPL est envisagée à l'intérieur des véhicules, notamment dans les voitures individuelles et les transports en commun tels que les avions ou les bateaux. Les données transmises concernent le réseau multimédia, mais également les

communications avec les voitures électriques en phase de chargement ont été envisagées, par exemple pour la gestion du paiement pour les flottes de véhicules. Pour ces réseaux, les débits peuvent être variables, entre l'indication d'un identifiant pour le chargement d'un véhicule et la transmission de vidéo HD dans un avion de 400 sièges. La fiabilité reste le problème majeur pour la transmission des données de commande du véhicule.

Les systèmes CPL actuels

Les différentes technologies CPL peuvent être classées en trois catégories [5], comme représenté dans la figure 7.

La première catégorie utilise les technologies Ultra Narrow Band, opérant de 30 Hz à 3 kHz. Ces technologies ont été utilisées notamment pour la relève automatique des compteurs à distance. Les

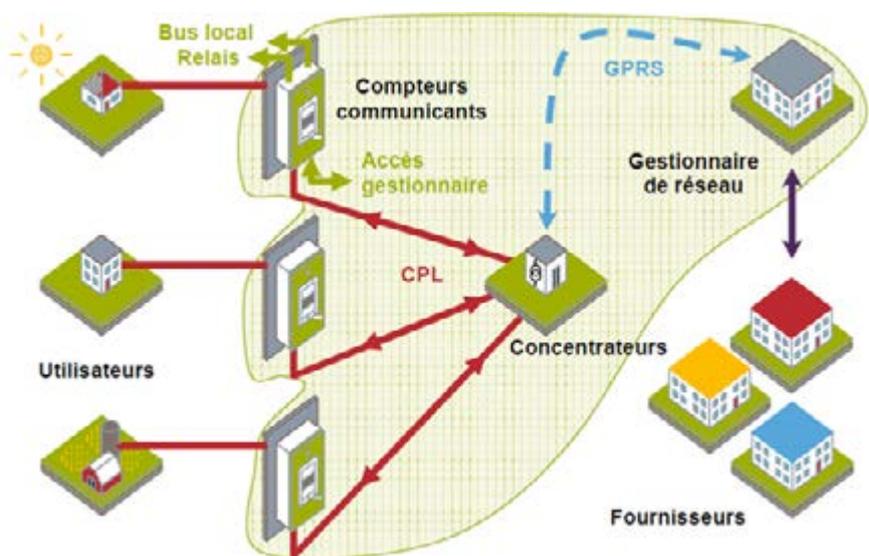


Figure 6 : Schéma d'un modèle couramment retenu pour un système de comptage évolué en électricité – Source : CRE

commandes et le contrôle. Les principaux avantages du CPL sur les autres moyens de communication filaire sont la réduction du poids, la diminution de la connectique pour les équipements embarqués et la réduction de la complexité du câblage. En particulier, les commu-

débits restent très réduits, de l'ordre de 0,001 bit/s pour Turtle et 100 bit/s pour TWACS.

La catégorie des technologies Narrow Band concerne les systèmes fonctionnant de 3 à 500 kHz.



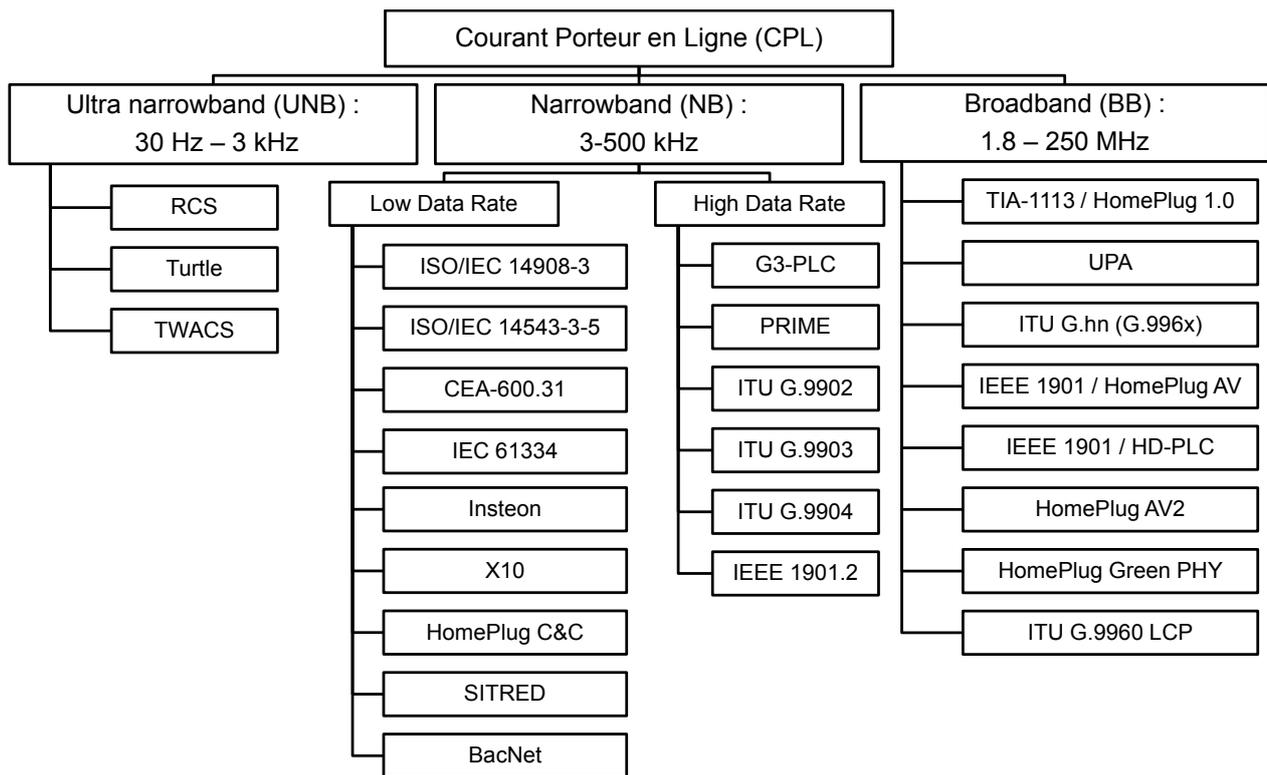


Figure 7 : Vue d'ensemble des standards et spécifications CPL UNB, NB et BB [5]

On distingue tout d'abord les systèmes Low Data Rate (LDR), capables de fournir des débits de l'ordre de quelques kbit/s. Ces technologies sont généralement basées sur des modulations mono-porteuses ou à étalement de spectre et sont utilisées pour la domotique ou la gestion des bâtiments.

Puis viennent les catégories NB High Data Rate (HDR) et Broad Band (BB), qui ont connu un développement important ces dernières années. Celles-ci sont présentées plus en détail dans les paragraphes suivants.

CPL à bande étroite

Les systèmes CPL-NB fournissant des débits importants sont aujourd'hui basés sur la modulation multi-porteuse Orthogonal Frequency Division Multiplexing (OFDM). Initialement, deux spécifications propriétaires ont été développées :

- La spécification G3-PLC opère dans les bandes de 35,9 à 90,6 kHz en Europe et dans différentes sous-bandes entre 150 kHz et 500 kHz suivant les réglementations des Etats-Unis et du Japon. La version européenne utilise une modulation OFDM sur

36 porteuses. Les constellations employées sont différentielles, de type Binary Phase Shift Keying (BPSK), Quadrature Phase Shift Keying (QPSK) et 8-Phase Shift Keying (PSK). Des modes robustes sont également définis avec des répétitions d'un facteur 4 à 6. Ces composants permettent d'obtenir un débit maximal sur la couche physique (PHY) de 233 kbit/s.

- La spécification Powerline Intelligent Metering Evolution (PRIME) fonctionne sur la bande de 42 à 88,9 kHz. La modulation est de type OFDM sur 97 porteuses. Les constellations utilisées sont de type BPSK, QPSK et 8-PSK différentielles. Cependant, à la différence de G3-PLC qui code l'information sur la différence de phase entre symboles successifs dans le domaine temporel, PRIME réalise une modulation différentielle dans le domaine fréquentiel, entre porteuses successives. Cette spécification offre une retransmission de type ARQ optimisée pour lutter contre le bruit impulsif. Le débit maximal sur la couche PHY est de 128,6 kbit/s. Une étude comparative des performances de ces systèmes est réalisée dans [9]. Notons qu'en 2012, ces deux spécifications pro-

priétaires ont été intégrées dans différentes recommandations de l'UIT : ainsi les spécifications G3-PLC et PRIME ont été respectivement intégrées dans les recommandations G.9903 et G.9904. La série de standards est complétée par la spécification G.9902, proche de G3-PLC. Notons enfin que l'IEEE a également développé un standard de ce type, IEEE 1901.2, publié en 2013. Ces différentes normes ne sont pas compatibles, mais des mécanismes existent pour assurer leur coexistence en minimisant les interférences mutuelles. Plus de détails sur les systèmes CPL-NB peuvent être trouvés dans [5].

CPL à bande large

Les systèmes CPL-BB pour le réseau domestique ont connu un essor important depuis les années 2000. A l'origine, trois consortiums industriels ont mis au point des spécifications opérant jusqu'à une fréquence maximale de 30 MHz, pour des débits de l'ordre de 200 Mbit/s : la spécification HD-PLC, la spécification HomePlug AV, et le système propriétaire du groupe Universal Powerline Alliance (UPA). Les systèmes HomePlug AV et UPA utilisent une modulation OFDM classique avec un fenêtrage temporel des

symboles, permettant de réduire l'étalement spectral. Le système HD-PLC utilise une technologie différente, basée sur l'OFDM à ondelettes. En termes de codage canal, des choix très différents ont été faits parmi des codes avancés, entre le codage Low Density Parity Check (LDPC) (HD-PLC), le Turbo Code convolutif (HomePlug AV) et la technique Treillis Coded Modulation (UPA). Enfin, on peut noter que les choix de constellations sont assez variables selon les spécifications : la technique Pulse Amplitude Modulation pour HD-PLC, une modulation QAM pour HomePlug AV, et une modulation PSK différentielle pour UPA. Malgré ces différences, ces trois systèmes fournissent des débits semblables.

Pour permettre l'essor de la technologie CPL-BB, la standardisation auprès d'organismes officiels a été essentielle. L'IEEE a dévelop-

n'est pas seulement applicable au réseau électrique, mais également aux lignes téléphoniques et aux câbles coaxiaux de télévision. D'un point de vue spectral, la bande dédiée au CPL est théoriquement étendue jusqu'à 100 MHz. Au niveau du traitement du signal en couche PHY, cette recommandation est très proche de la couche FFT-PHY du standard IEEE 1901. Une différence notable réside dans le choix du code correcteur d'erreur : alors que le standard IEEE 1901 met en œuvre un Turbo Code, la recommandation UIT-T G.9960 utilise un code LDPC. Au final, le débit maximal offert sur la couche PHY de la recommandation ITU-T G.9960 est de l'ordre de 1 Gbit/s.

Une évolution intéressante des systèmes CPL est leur extension à la technologie MIMO, par l'exploitation des trois conducteurs disponibles : la phase (P), le neutre

frastructure. Si les premiers systèmes UNB utilisaient de très basses fréquences en-dessous de 3 kHz, les débits associés ne permettaient pas d'envisager des réseaux de transfert de données.

Aujourd'hui, deux types de systèmes sont développés. Les technologies CPL-NB opèrent dans la bande de fréquence de 3 à 500 kHz, et sont principalement utilisées sur les réseaux de distribution BT pour mettre en œuvre des applications de type smart grid. L'application principale consiste à automatiser le relevé des compteurs électriques des abonnés. D'autres applications sont possibles, comme les réseaux de domotique pour l'automatisation des capteurs dans les bâtiments, ou encore la gestion de l'éclairage public. Ces applications requièrent des débits modérés de l'ordre de quelques dizaines de kbit/s, et ce sont la robustesse et la portée de ces systèmes qui orientent les développements.

Par comparaison, les technologies CPL-BB ont pour objectif de maximiser le débit afin de réaliser un réseau haut-débit à l'intérieur des bâtiments. Opérant aujourd'hui sur une bande de 1,8 à 86 MHz, ces systèmes mettent en œuvre des techniques de traitement du signal avancées, comme la transmission MIMO, pour obtenir des débits de l'ordre du Gbit/s.

Afin d'optimiser le débit et les performances de ces systèmes, une parfaite connaissance de l'environnement de propagation est nécessaire. Les études menées dans les milieux académique et industriel en termes de caractérisation du canal et du bruit électromagnétique ont ainsi été déterminantes pour définir les techniques de communication adaptées et exploiter de manière optimale le canal de transmission. A l'avenir, la mise en réseau de centaines d'objets communicants dans le smart grid nécessitera le développement de techniques robustes d'accès au médium partagé et de communication collaborative. ■

Pascal Pagani

CEA-CESTA, Le Barp, France

“Une évolution intéressante des systèmes CPL est leur extension à la technologie MIMO, par l'exploitation des trois conducteurs disponibles : la phase (P), le neutre (N) et la terre (T).”

pé le standard IEEE 1901 [10], couvrant les systèmes large bande résidentiels et d'accès. Deux couches PHY optionnelles sont décrites : la couche FFT-PHY, qui reprend la spécification HomePlug AV, et la couche wavelet-PHY, qui reprend la spécification HD-PLC. Ces deux couches PHY ne sont pas interoperables, mais un protocole spécifique, appelé Inter-System Protocol (ISP), a été défini pour assurer leur coexistence. Notons également qu'une option permet d'étendre les bandes de fréquences utilisées jusqu'à 50 MHz. Par ailleurs, pour la couche FFT-PHY, la constellation QPSK maximale est étendue aux symboles 4 096-QAM, permettant de transmettre jusqu'à 12 bits par porteuse. Ceci permet d'étendre le débit maximal de la couche PHY à 500 Mbit/s environ.

De son côté, l'UIT a développé la recommandation G.9960 pour les communications sur câble en environnement résidentiel [11]. La particularité de cette spécification est qu'elle

(N) et la terre (T). Cette innovation a été incluse dans les standards et spécifications CPL. En 2011, l'UIT a publié la recommandation G.9963 incluant cette fonctionnalité. Simultanément, le groupe HomePlug Alliance a développé la spécification HomePlug AV2, publiée en 2012 [12], définissant l'utilisation de la technologie MIMO. Parallèlement, la bande de fréquences allouée a été étendue à 86 MHz. Ainsi, les spécifications UIT-T G.9963 et HomePlug AV2 permettent aujourd'hui toutes les deux des débits maximums sur la couche PHY de l'ordre de 2 Gbit/s. Aujourd'hui, la technologie CPL MIMO est disponible dans les produits grand public.

Conclusion

En mettant à profit l'installation existante du réseau électrique, la technologie CPL permet de réaliser des réseaux de communication avec un très faible coût d'in-

Résumé

En utilisant le réseau de distribution d'énergie comme support de transmission, la technologie CPL (courants porteurs en ligne) permet des applications nouvelles, comme la transmission des données à très haut débit dans les réseaux domestiques, ou la gestion des réseaux intelligents, ou smart grids. Cet article décrit les principes de transmission pour la technologie CPL et présente les spécifications actuelles et applications envisagées. ■

Abstract

By using the power grid as a transmission medium, Power Line Communications (PLC) enable new applications, such as high data rate transmission in the home network, or the management of Smart Grids. This paper describes the transmission principles for the PLC technology and presents the current specifications and possible applications. ■



© Alexander Supertramp / Shutterstock

Bibliographie

- [1] N. Pavlidou, A. J. Han Vinck, J. Yazdani, et al., « Power line communications : state of the art and future trends », IEEE Communications Magazine, vol. 41, no 4, pages 34 – 40, avril 2003.
- [2] T. Huck, J. Schirmer, T. Hogenmuller, et al., « Tutorial about the implementation of a vehicular high speed communication system », in IEEE International Symposium on Power Line Communications and Its Applications, pages 162–166, avril 2005.
- [3] V. Degardin, I. Junqua, M. Lienard, et al., « Theoretical Approach to the Feasibility of Power-Line Communication in Aircrafts », IEEE Transactions on Vehicular Technology, vol. 62, no 3, pages 1362–1366, mars 2013.
- [4] L. Stadelmeier, D. Schill, A. Schwager, et al., « MIMO for Inhome Power Line Communications », in International ITG Conference on Source and Channel Coding (SCC), pages 1–6, janvier 2008.
- [5] L. T. Berger, A. Schwager, P. Pagani, et al. (éds.), MIMO Power Line Communications : Narrow and Broadband Standards, EMC, and Advanced Processing, Devices, Circuits, and Systems, Boca Raton : CRC Press, 2014.
- [6] F. Canete, L. Diez, J. Cortes, et al., « Broadband modelling of indoor power-line channels », IEEE Transactions on Consumer Electronics, vol. 48, no 1, pages 175–183, février 2002.
- [7] M. Zimmermann et K. Dostert, « An analysis of the broadband noise scenario in power-line networks », in International Symposium on Power Line Communications and Its Applications, Limerick, Ireland, pages 131 – 138, avril 2000.
- [8] J. Cortes, L. Diez, F. Canete, et al., « Analysis of the Indoor Broadband Power-Line Noise Scenario », IEEE Transactions on Electromagnetic Compatibility, vol. 52, no 4, pages 849–858, novembre 2010.
- [9] M. Hoch, « Comparison of PLC G3 and PRIME », in IEEE International Symposium on Power Line Communications and Its Applications (ISPLC), pages 165–169, avril 2011.
- [10] S. Galli et O. Logvinov, « Recent Developments in the Standardization of Power Line Communications within the IEEE », IEEE Communications Magazine, vol. 46, no 7, pages 64–71, juillet 2008.
- [11] V. Oksman et S. Galli, « G.hn : The new ITU-T home networking standard », IEEE Communications Magazine, vol. 47, no 10, pages 138–145, octobre 2009.
- [12] L. Yonge, J. Abad, K. Afkhamie, et al., « An Overview of the HomePlug AV2 Technology », Journal of Electrical and Computer Engineering, vol. 2013, no 892628, mars 2013.



HD-PLC broadband power line communications for IoT

How do the latest developments of the HD-PLC broadband power line communication technology address the challenges of IoT (Internet of Things)?

Introduction

«HD-PLC,» a technology for high-speed power line communication, was standardized in 2010 as IEEE 1901. However, with the widespread of IoT networks, a growing range of applications is being used, creating situations where the IEEE 1901 version on HD-PLC needs to be upgraded to offer longer communication distances and faster communication speeds. Many users are now demanding these types of improvements.

Let's discuss communication distance issues first. HD-PLC was originally designed as a communication infrastructure technology to improve domestic lifestyles. It provides networks in which housing

equipment, household appliances, sensors, etc., are permanently connected to the Internet. For building energy management systems (BEMS), factory energy management systems (FEMS), smart meters, etc., the distances between different terminals are mostly longer than for domestic use. HD-PLC-based networks must, therefore, be robust enough to allow terminals to communicate with each other in all given indoor communication environments.

To solve the above distance-related challenge, multi-hop technology, such as ITU-T G9905, originally published in 2013 and amended in 2016, has been developed for PLC. (We will discuss multi-hop technologies below). Even if multi-hop

technology greatly improved long range communication, the fact that power line distribution systems are usually built into star and tree structures makes sometimes difficult to install terminals in optimum locations to achieve better signal quality, and in some cases multi-hop technology is not enough to reach an isolated and distant PLC terminal.

We now come to communication speed issues. In the fields of security, entertainment, etc., high-definition video images (4K/8K) are captured by cameras connected to transmission paths composed of coaxial cables, and faster transmission of these images is now required. A network based on IEEE 1901 version HD-PLC offers a maximum physi- ●●●



Author

Hisao Koga received his B.S. and M.S. from Kyushu Institute of Technology, Japan, in 1993 and 1995, respectively, and received his Ph.D. from Kyushu University, Japan, in 2009. He joined Kyushu Matsushita Electric Co., Ltd. (currently Panasonic Corporation) in 1995. He developed ASICs for wireless base station and DECT phones from 1995 to 2000. He has been engaged in R&D of HD-PLC (mainly physical layer) and standardization of IEEE 1901 since 2001 at Panasonic Corporation.

cal line transmission rate (theoretical value) of 240 Mbps in the 2-28 MHz band. When such networks also include various pieces of application software as described above, the network's transmission speed may become insufficient.

HD-PLC Quatro Core has been designed to solve these problems. Specifications based on this technology were approved as IEEE 1901a in March 2019 and published as IEEE 1901a-2019 standard in May in the same year. IEEE 1901a is an improvement on the conventional IEEE 1901-2010 in both communication distance and speed. It achieves to double IEEE 1901-2010's communication distance by adopting a communication band of 1/2 or 1/4 of IEEE 1901-2010 band and achieves to offer a maximum physical line transmission rate of 1 Gbps by using an expanded communication band 2 or 4 times the IEEE 1901 band.

This document provides a summary of the HD-PLC Quatro Core technology and an introduction to some of its functions. The multi-hop technology used in third-generation HD-PLC is also included to fourth-generation HD-PLC Quatro Core and will therefore be described as we discuss the HD-PLC Quatro Core technology.

HD-PLC Quatro Core technology

This technology is different from IEEE 1901-version HD-PLC in that a wavelet

OFDM transmitter executes an additional resampling process (figure 1). This gives the HD-PLC Quatro Core the new function of switching between long-distance communication mode and high-speed communication mode while maintaining its compatibility with IEEE 1901 version HD-PLC.

Long-distance communication and high-speed communication

When power line communication (PLC) technology is used for B-to-B (business-to-business) communications involving BEMS, FEMS, smart meters, etc., and for B-to-C (business-to-consumer) communications involving residential equipment, household appliances, sensors, etc., communication across long distances with high robustness is a key factor. This is because network equipment is installed in very different types of locations, such as commercial buildings and factories for B-to-B communications; and B-to-C communications such as in condominiums are affected by power line noise and interference from domestic electrical devices. In both cases, therefore, improved terminal connectivity and reliable communication are required.

To improve the stability of communication, the signal-to-noise ratio (SNR) in the communication band needs to be raised: in other words, signal attenuation and noise in the communication band must be reduced. However, power lines, which differ from ordinary communication lines,

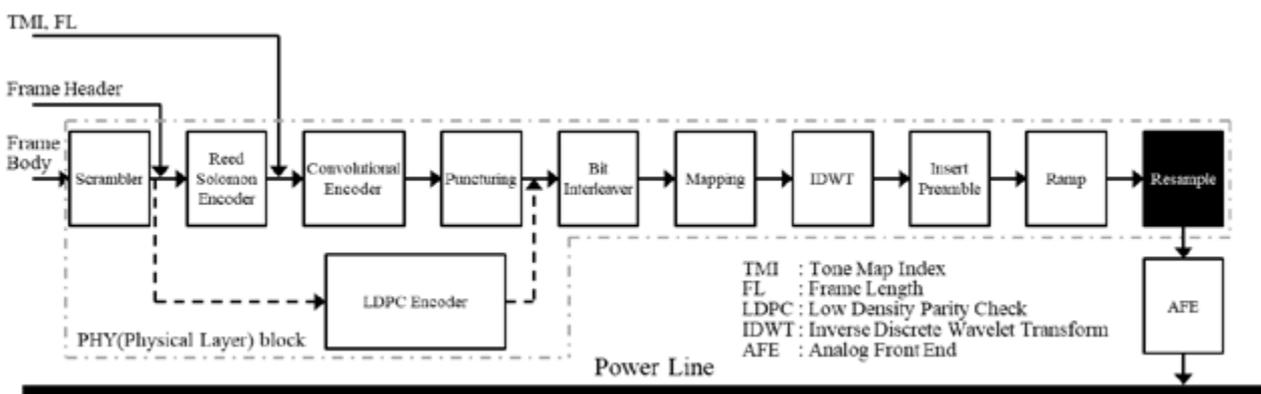


Figure 1: Flexible channel wavelet OFDM transmitter.

are laid in a rather disadvantageous communication environment: no impedance is specified for power lines, many branch nodes are present, and various kinds of loads (electrical devices) are connected to them. To improve the SNR of power lines to allow them to function as reliable

to ensure that a sufficient number of subcarriers remain effective in the communication band. Achieving this configuration requires a function that makes the symbol length variable in line with transmission characteristics, thereby allowing a change in subcarrier intervals.

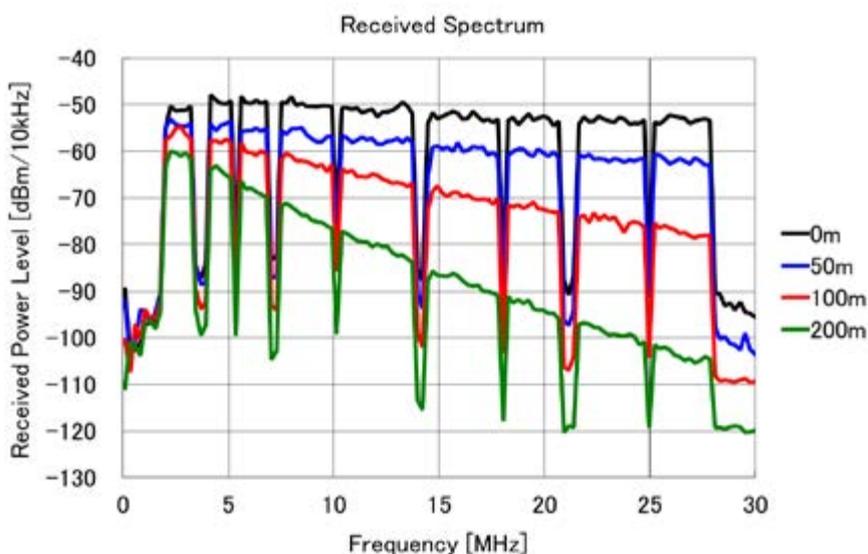


Figure 2: Influence of a single-wire VVF cable.

communication paths, communication through them must be performed using a band that has less attenuation and noise.

Measuring the transmission characteristics of a single-line cable serving as a power line reveals that signal attenuation is greater at higher frequencies. **Figure 2** shows the spectrum of a received PLC signal for a single-line vinyl insulated vinyl sheathed flat cable (VVF) under noiseless conditions. In a single-line cable, the signal attenuates rapidly in the high frequency band with the increase of cable length. This leads to a situation in which a small proportion of the signal in the low frequency band is unaffected, but the rest of the signal attenuates over the entire communication band, thus failing to achieve a sufficient SNR. In this case, communication fails. To achieve long-distance communication, therefore, it is necessary to use the low frequency band

In the fields of security, entertainment, etc., today, the video images captured by cameras are in high definition (4K/8K), for which high-speed communication is essential. Dedicated coaxial cables are typically used in such applications. On such cables signal attenuation and noise are lower than on power lines. To achieve high-speed communication on

“Measuring the transmission characteristics of a single-line cable serving as a power line reveals that signal attenuation is greater at higher frequencies.”

ordinary power lines, we have adopted a system in which the existing wavelet engine is used to change subcarrier intervals to allow broadband communication.



Author

Jean-Philippe Faure is CEO of Progilon. He is a world-class expert in power-line communications (PLC). He was a pioneer of broadband PLC activities in IEEE and IEC-CISPR. As founding chair of the working groups, he led the development of IEEE 1901-2010, first global broadband powerline communication MAC/PHY standard and the development of an EMC draft standard that was approved as harmonized standard CENELEC EN 50561-1 in 2013. In 2016-2018, he was chair of the IEEE Standards Association (IEEE-SA) Standards Board, continuously overseeing 650+ standards development projects involving 20 000+ developers worldwide. He currently serves as member of the IEEE-SA Board of Governors. He received his master's degree in engineering from Ecole centrale de Marseille in France in 1987.

Mode	Symbol length [·s]	Frequency offset [MHz]	Channel ID (CID)
XB1-1Ch	8.192	0	Télérelevé, détection de surcharge
XB1-2Ch	16.384	0	Smart grids, paiement personnalisé
		15.625	Réseau local domestique
XB1-4Ch	32.768	0	x-1
		7.8125	x-2
		15.625	x-3
		23.4375	x-4
XB2-1Ch	4.096	0	x-5
XB2-2Ch	8.192	0	x-6
		31.25	x-7
XB2-4Ch	16.384	0	x-8
		15.625	x-1
		31.25	x-9
		46.875	x-2
XB4-1Ch	2.048	0	x-3
XB4-2Ch	4.096	0	x-10
		62.5	x-11
XB4-4Ch	8.192	0	x-12
		31.25	x-8
		62.5	x-13
		93.75	x-1
		31.25	x-9
		62.5	x-14
		93.75	x-15

Table 1: Frequency offset, symbol length, and channel ID in each mode

●●● Modes and channels

Table 1 shows symbol length, frequency offset, and channel ID for each mode. There are nine modes that vary according to the combinations of frequency bands used and the numbers of channels present in the frequency bands. Three kinds

of frequency bands are used: the Signal Channel Wavelet (SCW) band (XB1), which is used in IEEE 1901 version HD-PLC; Extended band 2 (XB2), which is two times the SCW band; and Extended band (XB4), which is four times the SCW band. These three frequency bands in-

clude one channel, two channels, and four channels, respectively. **Figure 3** shows the relationship between channel IDs set respectively in the modes and frequencies. XB1-1Ch mode (Channel ID: x-1) is the mode equivalent to the IEEE 1901 version of HD-PLC, in which com-

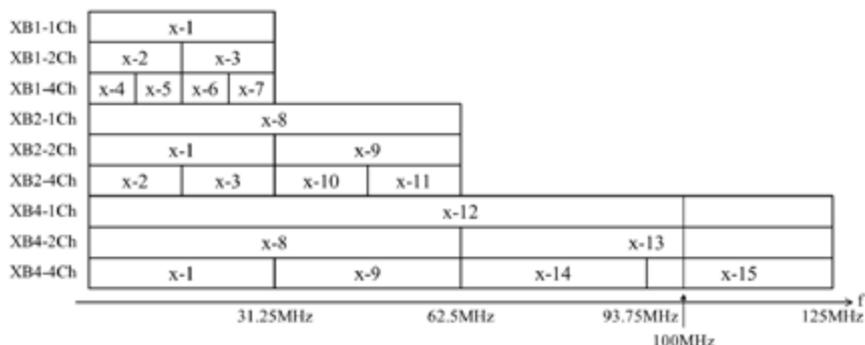


Figure 3: Relationship between mode, frequency band, and channel ID

munication interoperability with terminals conforming to IEEE 1901 is maintained. In XB1-2Ch mode, the symbol length becomes double than in XB1-1Ch mode, meaning that the subcarrier intervals are now half those of XB1-1Ch mode, in which case two channels (Channel ID: x-2, x-3) can be used by using frequency offset. In this mode, symbol length variations combined with frequency offset allow the formation of 15 channels. The user is, therefore, able to choose the channel that best suits the conditions of the transmission path.

The resampling process

To change the basic symbol length and subcarrier intervals in the XB1-1Ch mode (IEEE 1901 version HD-PLC), the resampling process is carried out in PLC. Figure 4 shows specific examples of the resampling process. **Figure 4(a)** shows the resampling process carried out when the number of channels is two (Channel ID: x-3), and **Figure 4(b)** shows the resampling process carried out in when the number of channels is four (Channel ID: x-5).

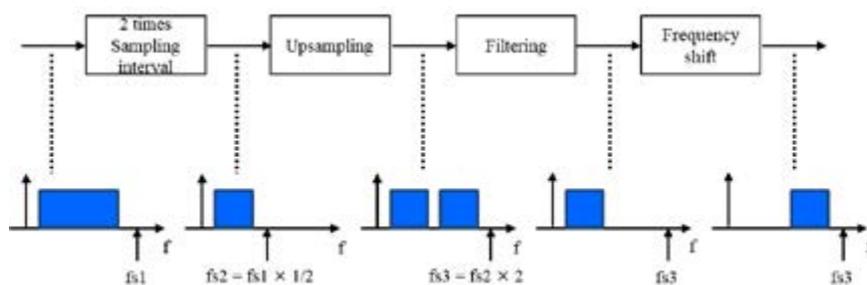
In the case of figure 4(a), the sampling frequency ($2 \times fs1$) is 62.5 MHz. When the sampling cycle is doubled, a signal with a frequency lower than the Nyquist frequency ($fs1$) comes to have a Nyquist frequency $fs2$ and is rearranged in a frequency band lower than the Nyquist frequency $fs2$. The signal is then subjected to sampling at a sampling rate that is double the original sampling rate, which creates aliasing noise in a frequency band

higher than the Nyquist frequency $fs2$, thus changing the Nyquist frequency $fs2$ into Nyquist frequency $fs3$. The aliasing noise is then eliminated through filtering, which is followed by frequency offset. Hence a channel with ID x-3 is created.

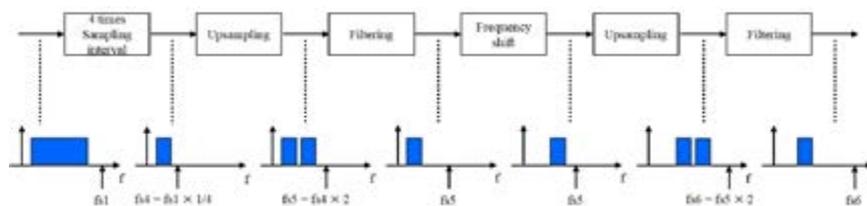
In the case of figure 4(b), the sampling frequency ($2 \times fs1$) is 62.5 MHz, as in the above case. Increasing the sampling cycle fourfold creates a Nyquist frequency of $fs4$, thus rearranging the signal in a frequency band lower than the Nyquist frequency $fs4$. The signal is then subjected to sampling at double the original sampling rate, which creates aliasing noise

in a frequency band higher than the Nyquist frequency of $fs4$, thus changing the Nyquist frequency $fs4$ into Nyquist frequency $fs5$. The aliasing noise is then eliminated through filtering, which is followed by frequency offset to a higher frequency. The signal is then again subjected to sampling at double the original rate, which creates aliasing noise in a frequency band higher than the Nyquist frequency of $fs5$, thus changing the Nyquist frequency $fs5$ into Nyquist frequency $fs6$. Finally, the aliasing noise is eliminated through filtering, which creates the channel with ID x-5.

Other channels with different channel IDs are created using the same method, by which signal rearrangement is carried out based on the signal in the XB1-1Ch mode. In actual communication, the transmission characteristics of each channel are estimated to select the most suitable channel to be used. This is done by calculating the respective physical line transmission rates of channels from the SNRs of subcarriers making up the channels, and then choosing the channel that is the least affected by attenuation and noise.



(a) XB1-2Ch mode, 2nd channel (Channel ID: x-3)



(b) XB1-4Ch mode, 2nd channel (Channel ID: x-5)

Figure 4: Example of resampling process

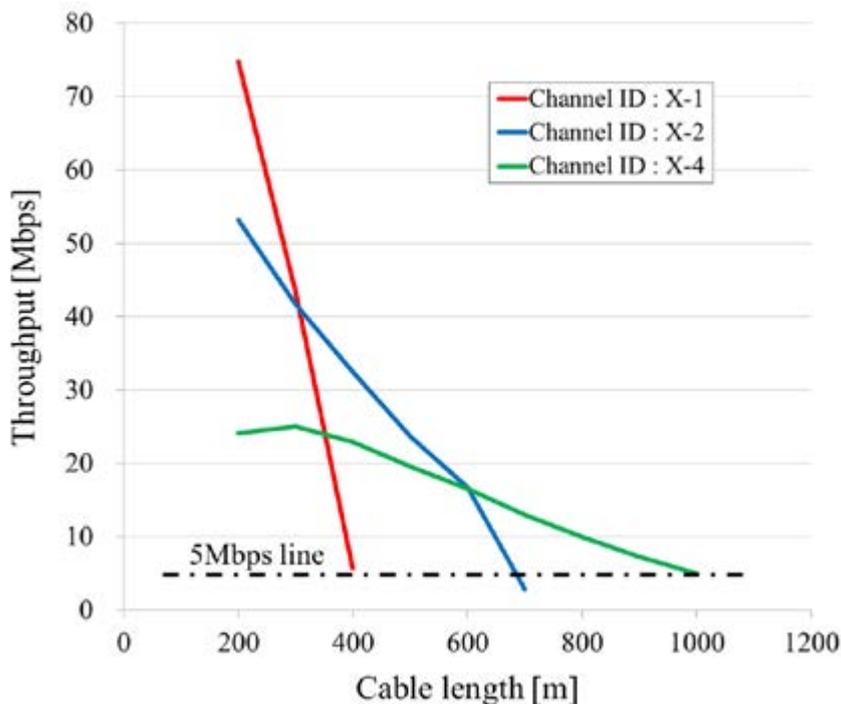


Figure 5: Throughput of channel ID (x-1, 2, 4) with FPGA and simulated transmission line.

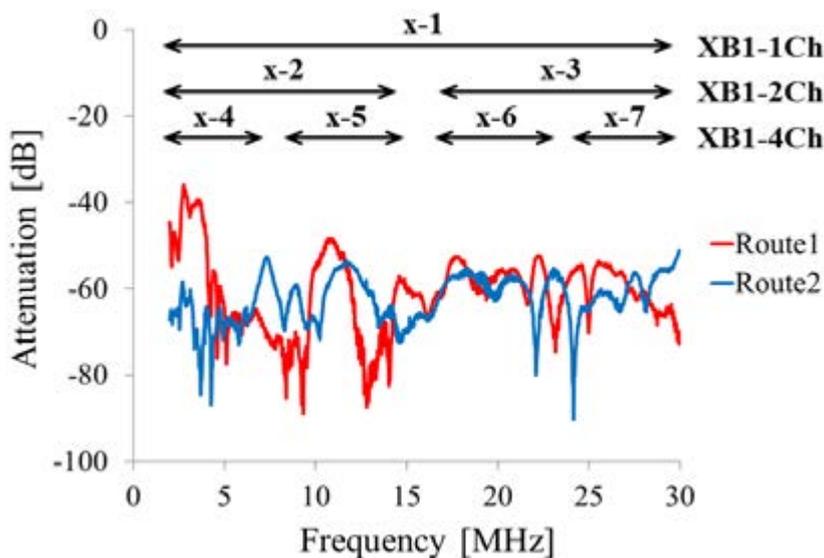


Figure 6: Transmission characteristics (Path 1 and Path 2).

●●● Evaluation

This section describes the results of two communication evaluation tests using a field-programmable gate array (FPGA).

Communication characteristics obtained using a simulated VVF cable

In this test, the characteristics of a single-line VVF cable, a type frequently used for

indoor wiring, were simulated by inputting data on the attenuation characteristics of VVF cables with different lengths to a commercially-available simulator (PLCS 3000) to model a set of transmission paths.

Figure 5 is a graph in which the throughput of channels with IDs (x-1), (x-2), and (x-4) is plotted against the len-

gth of the VVF cable. When it is short, the channel with ID (x-1), which uses a wide frequency band, allows high-speed transmission. However, with the increase of the cable length, the channel with ID (x-2) becomes the high-speed path and, finally, the channel with ID (x-4) takes over as the high-speed path. Comparing the respective communication distances of these cables at a transmission rate of 5 Mbps reveals that the communication distance of the channel with ID (x-2) is about 1.7 times that of the channel with ID (x-1), and the communication distance of the channel with ID (x-4) is about 2.5 times that of the channel with ID (x-1). This is because, as indicated in figure 2, as the single-line VVF cable increases in length, the VVF cable characterized by its drastic signal attenuation in the high-frequency band, demonstrates its reliability in communication modes in which the low frequency band is utilized.

In a communication environment in which actual power lines are used, the characteristics of transmission paths are more complicated. It is, however, a confirmed fact that the characteristics of cables tend to approach the characteristics shown in figure 2 when the cable length increases. Communication utilizing a narrow-band channel in the low-frequency band is, therefore, a very useful approach. If colored noise is present in a band with multiple channels, correct estimation of the transmission path allows optimum communication.

Communication characteristics obtained in an actual communication environment

In an actual communication environment, one wall outlet and two wall outlets, which are distant from an indoor distribution board, were selected from the first floor and the second floor of a building, respectively, to create two paths, each linking a pair of wall outlets located across both floors (**Path 1 and Path 2**). The transmission characteristics of each path are shown in figure 6. Each path shows signal attenuation of about 60 dB. Wall outlets in a house are

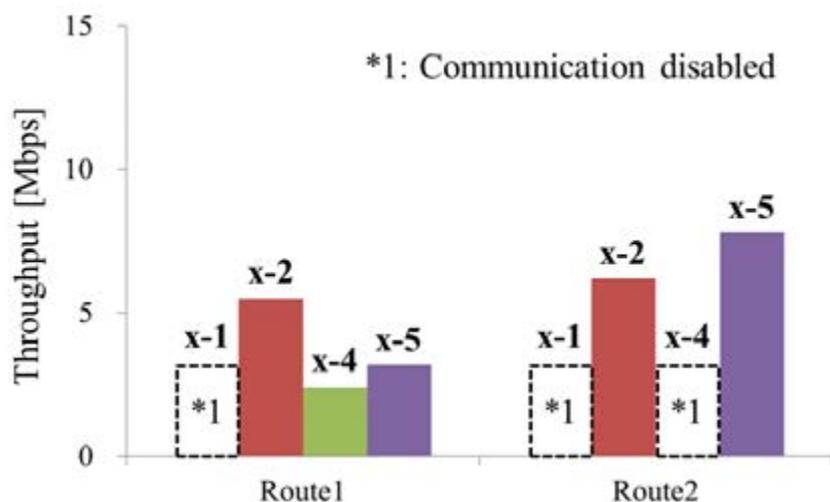


Figure 7: Transmission rate with TCP

connected to various pieces of electrical equipment, and, when noise from such electric equipment is taken into consideration, it is safe to say that these transmission paths provide an unfavorable communication environment. **Figure 7** shows the transmission rates of two paths that result when TCP communication is performed between FPGAs. Both paths fail to establish a communication link when the channel with ID (x-1) (IEEE 1901 version HD-PLC) is used. Path 1 allows communication at the highest transmission speed when the channel with ID (x-2) is selected, while Path 2 allows the same when the channel with

subcarrier intervals and using a band that has less attenuation and noise.

An evaluation test of high-speed communication was carried out in a laboratory in which a static environment with less attenuation was maintained. In this test, an HD-PLC evaluation device (DisLINE) was used as the transmission path and selecting the channel with ID (x-8) yielded a maximum physical line transmission rate of 450 Mbps in transmission between FPGAs. We consider this result to be appropriate when taking into consideration the fact that the theoretical maximum physical line trans-

“HD-PLC Quatro Core technology is more efficient than conventional technology for improving the robustness and transmission speed of a transmission path.”

ID (x-5) is selected. In Japan, transmission power must be reduced by 10 dB to 15 dB in transmissions performed in a frequency band above 15 MHz (channels with IDs (x-3), (x-6), and (x-7)). In this frequency band, therefore, no SNR for effective communication can be secured and, consequently, no link is established. This evaluation test demonstrates the effectiveness of changing the

mission rate when using the channel with ID (x-8) is 500 Mbps and that the maximum transmission rate (measured value) of a coaxial LAN converter on the market is about 90% of its theoretical value. A coaxial cable serves as a transmission path on which high-speed communication technology is used, in which case the coaxial cable suppresses noise sufficiently to make it a reliable transmis-

sion path. We assume, therefore, that a transmission path in an actual communication environment based on coaxial cables will demonstrate the same communication characteristics as shown in this test.

The above test results thus indicate that HD-PLC Quatro Core technology is more efficient than conventional technology for improving the robustness and transmission speed of a transmission path.

Multi-hop technology for HD-PLC Quatro Core

Multi-hop technology is important for IoT applications in IEEE 1901 networks. Multi-hopping is provided using IUT-T G.9905, a multi-hop routing protocol (centralized metric based source routing: CMSR), which is robust, includes less overhead, and is therefore suitable for large-scale IEEE 1901 networks. The major functions of G.9905 are as follows.

- Highly reliable and rapid route detection: a two-way route between the master and a terminal is detected through the exchange of hello messages with two-way link quality taken into consideration. High-speed mode in which hello messages are exchanged at short intervals during the route detection phase allows rapid route detection.

- Control packets with less overhead: control packets are limited in function to route detection and maintenance. This allows the generation of control packets, which increase as terminals number increases, in $O(N)$ order (N denotes the number of terminals present in the network).

- Sound network: multiple reliable routes are established in the network. Even if noise develops at a specific point in the network and causes route-breaking, an alternative route is created to keep the network running. In addition, hello messages carrying useful information on the network deliver such information to every terminal.



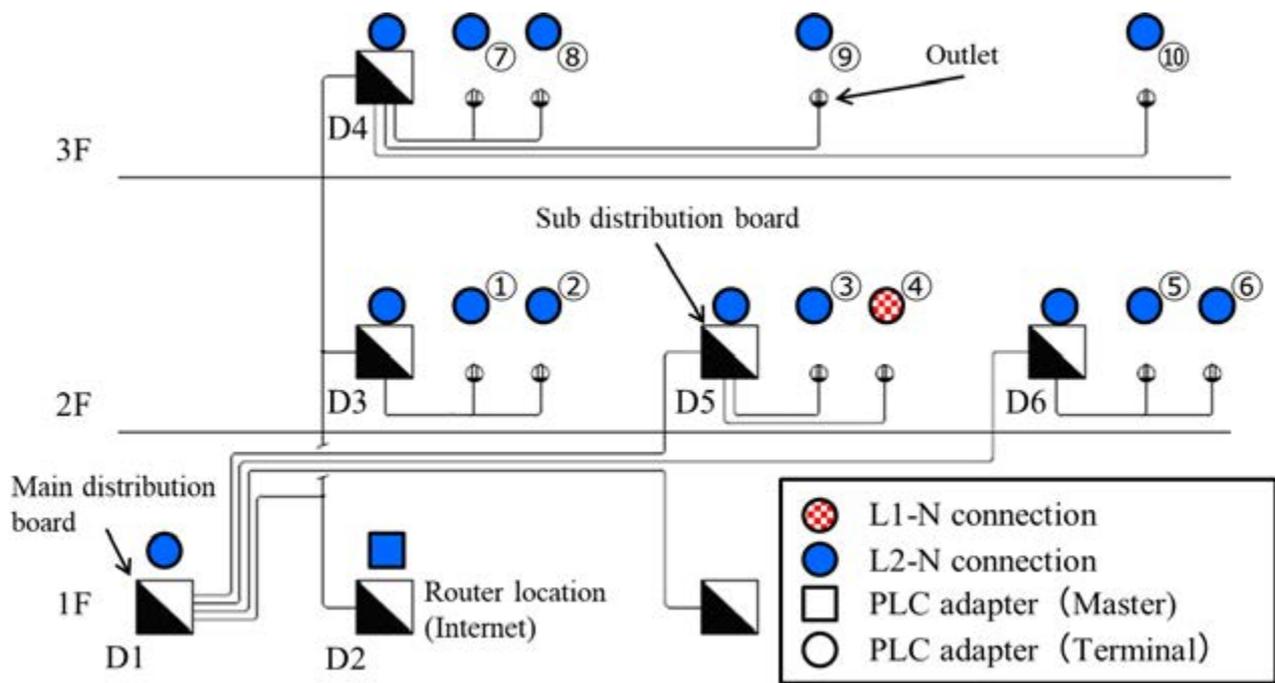


Figure 8: Electric wiring system diagram and example of installation.

- Supports flexible packet transmission: data packets are delivered to both downstream and upstream through source routing and/or hop-by-hop routing. The network also supports terminal-to-terminal communication.

This newly developed multi-hop technology enables 10 hops between terminals at maximum, thus allowing a single master to control up to 1 024 terminals. By using HD-PLC multi-hop technology, an extensive network infrastructure can be built between different floors of a building whose design prevents radio communication, using existing power lines such as vertical trunk lines.

Figure 8 is a diagram showing an electric wiring system in a three-story building. A PLC adaptor with a master function is installed on a main distribution board (D2) close to a router (Internet port), while PLC adaptors, each having a terminal function, are installed on sub-distribution boards and wall outlets, respectively. In this system, most of the wall outlets are connected to an L2-N phase line. All PLC adaptors, except for adaptors plugged into wall outlets (4), are therefore connected to the L2-N phase line.

Figure 9 shows a multi-hop topology resulting from the above setup. Figure 9 demonstrates that the whole system connection is established across three hops from the main distribution board (D2). Measurements of the physical line transmission rates (PHY rates) of wall outlets (3) and (4) on a sub-distribution board (D5) indicate that the communication speed drops in the event of in-

figure 9 and PHY transmission rates are obtained first. Then, the topology is optimized by checking the PHY transmission rates between PLC adaptors and adjusting the locations of installation of the PLC adaptors on the distribution boards such that no situation can arise in which the communication speed on the upstream side close to the router will drop significantly.

“PLC technology can be used on any kind of electric cable, including power lines. In schools, hospitals, nursing care facilities, etc., for example, coaxial cables for antennas might be routed to individual rooms, while phone lines are laid in other types of non-residential buildings.”

ter-phase connection. Effective transmission rates in data transmission from the router to respective wall outlets in each floor range from 10 Mbps to 20 Mbps. In an ordinary system construction procedure, the network topology of fi-

In this example, the main aim is to set up Wi-Fi access points across the whole building. To make this possible, the stairwell area, in which radio signals remain strong, is covered by a radio LAN, while in meeting rooms, in which radio signals tend to

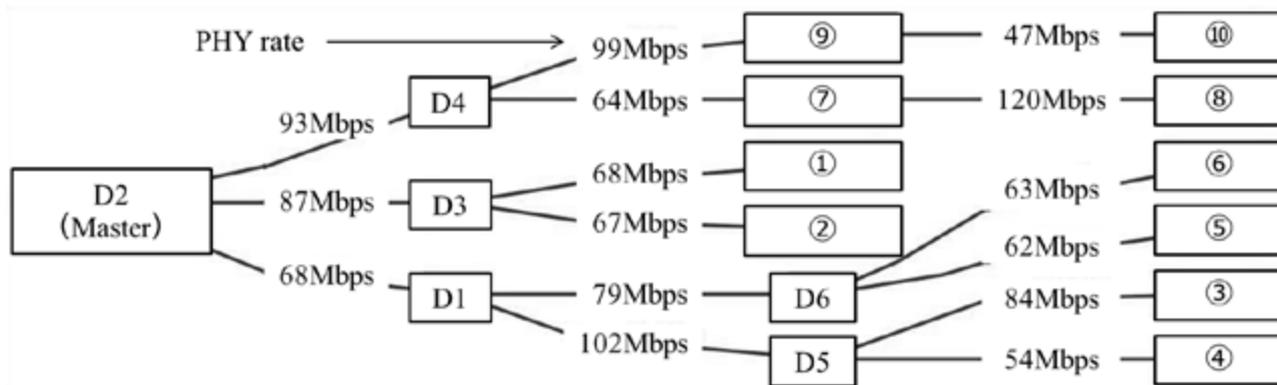


Figure 9: The multi-hop topology in Figure 8.

be weak, Wi-Fi hotspots are created by connecting radio LAN access points to PLC adaptors using Ethernet cabling.

As demonstrated in this example, PLC is a very useful technology for supplementing a radio communication network.

Conclusion

HD-PLC Quatro Core, a technology designed for building a network infrastructure for IoT applications that covers both residential spaces and the social infrastructure, has been standardized as IEEE 1901a.

HD-PLC Quatro Core has lower communication speed and stability than wired

communication using dedicated lines but is far superior in reliability. It is therefore a communication technology suitable for building an IoT infrastructure in residential spaces, buildings, etc. We anticipate the rapid uptake of this technology.

PLC technology can be used on any kind of electric cable, including power lines. In schools, hospitals, nursing care facilities, etc., for example, coaxial cables for antennas might be routed to individual rooms, while phone lines are laid in other types of non-residential buildings. In such cases, if PLC technology is used, not only power lines but also other existing lines can be used to facilitate network building in existing buildings.

PLC technology also allows mobile IoT equipment to be incorporated into networks, thus allowing PLC technology and the wireless communication technology to be combined to supplement each other. As a result, simpler and more convenient networks can be built.

We believe that the technology described herein will be of great assistance in connecting IoT equipment, which is expected to increase exponentially, to networks. ■

Hisao Koga
Panasonic, Japan
Jean-Philippe Faure
Progilon, France

Abstract

The fourth-generation HD-PLC Quatro Core technology perfectly meets new IoT networks requirements for longer communication distances and faster communication speeds. It achieves to double the IEEE 1901-2010 communication distance and offers a maximum physical transmission rate of 1 Gbps. Published as IEEE 1901a-2019 standard the Quatro Core technology supplements the HD-PLC Multi-Hop technology (ITU-T G9905) that enables 10 hops between terminals. To conclude, the HD-PLC technology enables not only the deployment of networks in in-house environments such as homes, buildings, and factories where sometime the design prevents radio communication, but also the deployment of large outdoor networks covering areas of some square kilometers. ■

Résumé

La technologie de quatrième génération HD-PLC Quatro Core répond parfaitement aux nouvelles exigences des réseaux IoT réclamant de plus longues distances et des vitesses de communication plus rapides. Elle permet de doubler la distance de communication du standard IEEE 1901-2010 et offre un débit de transmission de 1 Gbit/s. Publiée en tant que standard IEEE 1901a-2019, la technologie Quatro Core complète la technologie HD-PLC Multi-Hop (ITU-T G9905) qui permet d'effectuer 10 sauts entre les terminaux. Ainsi, la technologie HD-PLC permet le déploiement non seulement de réseaux dans des environnements domestiques tels que des habitations, des immeubles ou des usines où parfois la conception empêche la communication radio, mais aussi de grands réseaux extérieurs s'étendant sur plusieurs kilomètres carrés. ■



Les courants porteurs en ligne (CPL) au service des réseaux électriques intelligents

Mise en œuvre d'une solution industrielle : défis et opportunités

En plus de l'installation d'un nouveau compteur électrique, le déploiement de Linky conduit à la mise en place d'un véritable réseau de communication sur le réseau basse tension fondé sur les CPL...

Introduction

Les réseaux électriques intelligents (REI), ou encore smart grids, constituent l'une des orientations technologiques de la modernisation des réseaux pour faire face aux mutations en cours du système électrique : bidirectionnalité des flux d'énergie liée au développement de la production décentralisée, impact de l'économie collaborative, mobilité électrique, etc. En pratique, l'évolution des réseaux existants vers les REI consiste à les doter de fonctions permettant de mieux les commander et les observer pour un pilotage de plus en plus temps réel, avec une unité de temps de référence de l'ordre de la dizaine de millise-

condes à plusieurs dizaines de minutes selon les applications.

Le déploiement massif des compteurs communicants Linky par Enedis est la première brique des REI sur le réseau électrique en France : il a démarré en 2015 sur l'ensemble du territoire français métropolitain pour atteindre un nombre total de 35 millions d'unités à l'horizon 2021. Il s'appuie sur une infrastructure de communication CPL, qui perdurera sur une durée au moins égale à 20 ans et devient ainsi un élément central des REI sur la basse tension (BT), ouvrant des perspectives à des services innovants. De manière plus générale, les CPL sont et resteront une réalité industrielle pour

les prochaines décennies en France et à l'international dans un contexte où l'IoT (Internet of Things) et les réseaux contraints (LoRaWAN, SigFox, technologies basées sur la norme IEEE 802.15.4) se développent fortement. Plus particulièrement, le CPL G3 et autres technologies CPL bande étroite remportent de plus en plus de marchés à l'international, principalement en Europe (Enedis, Iberdrola, Enel, etc.), en Asie (SGCC en Chine), en Afrique ou encore au Proche et Moyen Orient avec comme vecteur de croissance principal le comptage communicant.

Dans la suite de cet article, après une présentation de l'architecture retenue pour

Linky, les défis du déploiement à grande échelle des CPL bande étroite seront abordés à travers le développement de quelques points emblématiques vus par l'utilisateur final. En seconde partie, une ouverture sur les perspectives permises par les CPL au service des REI de demain est proposée.

Architecture de l'infrastructure Linky

Le système de comptage communicant Linky suit les concepts de l'architecture générique des systèmes dits « AMM ¹ » illustrée en **figure 1**.

Les compteurs communicants Linky, raccordés au réseau de distribution BT, communiquent via le réseau local CPL avec les concentrateurs ins-

les opérateurs de télécommunication publics, connecte les concentrateurs au système central, qui est lui, raccordé aux autres systèmes d'information du distributeur Enedis. Enedis fait ensuite le lien avec les fournisseurs d'électricité qui peuvent notamment proposer différentes offres de marché en s'appuyant sur l'infrastructure Linky.

Les concentrateurs ont pour rôle la collecte quotidienne des index de consommation et leur stockage temporaire avant l'envoi de ces données au SI central. Ils servent aussi de passerelle de communication pour permettre, par exemple, le changement de la grille tarifaire spécifique au contrat souscrit avec le fournisseur d'électricité, ou encore à remonter des anomalies telles qu'une surtension.

Les défis techniques d'une solution déployée à grande échelle

L'interopérabilité

Fondements et mise en place

L'interopérabilité est la police d'assurance d'un projet industriel pérenne déployé à grande échelle. Elle est nécessaire sur la durée de vie du projet pour assurer la continuité de fourniture des éléments du système, et pour son maintien en conditions opérationnelles. Pour le projet Linky, et plus particulièrement pour la technologie CPL G3, l'interopérabilité résulte d'un long processus rappelé en **figure 2**. La première spécification, publiée en 2009, a été établie selon les exigences techniques exprimées par Enedis. Elle a été le point de départ des travaux de validation sur

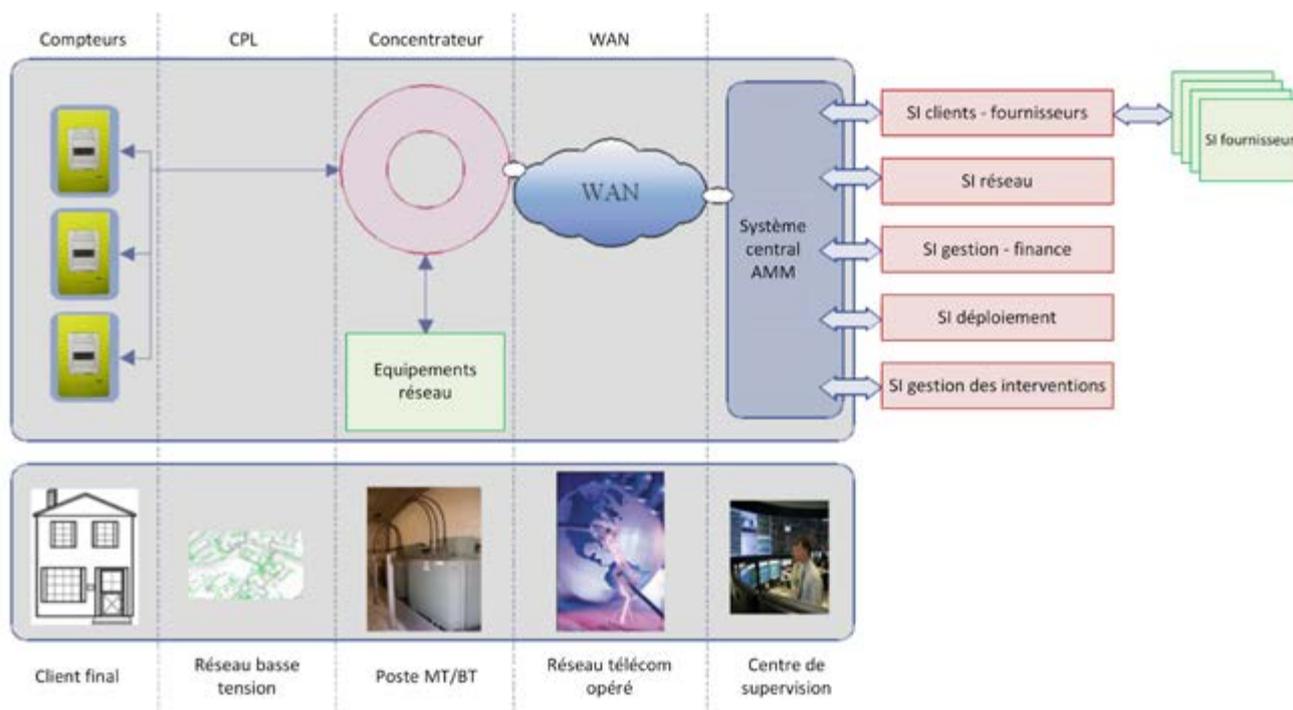


Figure 1 : Architecture générique d'une infrastructure de comptage dite « AMM » avec réseau local en CPL.

tallés dans les postes de transformation moyenne tension/basse tension. Le réseau WAN² cellulaire, fourni par

Pour le réseau local CPL utilisé pour ces interactions entre compteurs et concentrateurs, Enedis a retenu la technologie CPL G3 qui couvrira la majorité du parc Linky avec 32 millions d'unités.

le terrain et des cycles de discussion en normalisation pour atteindre la maturité nécessaire à son déploiement industriel. Ce processus a mobilisé de nombreuses parties prenantes (utilisateurs, fondeurs, équipementiers) qui se sont réunies au

¹ AMM : Advanced Meter Management.

² WAN : Wide Area Network



L'auteur

Cédric Lavenu est diplômé de l'ES-IEE (Ecole supérieure d'ingénieurs en électrotechnique et électronique). Il est ingénieur-chercheur à EDF R&D et contribue aux activités smart grid du groupe EDF sur les aspects télécom, dont le projet Linky mené par Enedis. Il s'est spécialisé dans les technologies CPL et les standards IoT, notamment en s'impliquant activement dans des organismes de normalisation et des alliances d'industriels tels que l'IEC, le CENELEC, l'IEEE ou encore l'Alliance CPL G3. Il est également détenteur de plusieurs brevets internationaux dans le domaine des CPL.

sein d'une association internationale : l'Alliance CPL G3.

L'Alliance CPL G3 a été créée en 2011 pour promouvoir la technologie CPL G3 qui se positionne sur le marché mondial au service d'applications multiples. Elle est garante d'une spécification CPL G3 partagée par ses membres et assure son évolution sur le long terme. Les amendements décidés sont ainsi injectés dans les organismes de normalisation. Historiquement, elle a essentiellement alimenté les travaux de l'IEEE et de l'UIT-T. A ce jour, l'UIT-T a publié les normes de référence G.9901 et G.9903 qui décrivent la technologie CPL G3.

Elle organise enfin le processus de certification qui s'appuie sur trois piliers fondamentaux pour assurer l'interopérabilité à grande échelle de nombreux produits :

- la conformité, c'est à dire la vérification de la bonne implémentation de chaque exigence exprimée dans la spécification CPL G3 ;
- l'interopérabilité, c'est-à-dire la vérification du bon fonctionnement des communications entre le produit testé et un groupe de produits de référence ;
- la performance, qui n'est pas à négliger pour que l'interopérabilité soit effective du point de vue système.

Aujourd'hui, l'Alliance CPL G3 a certifié près de 300 produits visant différentes applications dans le monde entier.

Présentation de la technologie CPL G3

Le CPL G3 fait l'objet d'une norme internationale de l'UIT-T avec les recommandations G.9903 [1], décrivant la pile protocolaire, et G.9901 [2], qui définit différents plans de fréquences dans la gamme des CPL bande étroite (entre 3 et 500 kHz) garantissant ainsi la compatibilité de la technologie avec les différentes réglementations mondiales, comme illustré en **figure 3** :

- en Europe, la réglementation fait référence à la norme harmonisée EN 50065-1 [7] prescrivant les conditions d'utilisation de la bande 3-148,5 kHz : la bande CENELEC A (3-95 kHz) est réservée aux « applications de surveillance et de pilotage du réseau de distribution à basse tension », alors que la bande supérieure ne fait pas l'objet de restrictions particulières. Il est également possible d'utiliser la bande 148,5-500 kHz en passant par un organisme notifié afin de justifier du respect des exigences essentielles de la directive CEM [10] qui couvre les CPL ;



Figure 2 : Frise chronologique de l'histoire de la technologie CPL G3 et de l'Alliance CPL G3.

- au Japon et aux Etats-Unis, les CPL peuvent être utilisés dans une bande de fréquence plus large ;
- dans le reste du monde, les réglementations s'inspirent des cas précédents.

La pile protocolaire CPL G3 s'appuie sur une couche physique OFDM spécifique intégrant des codes correcteurs d'erreurs Reed Solomon et convolutifs complétés par l'exploitation de la diversité temps-fréquence grâce à un entrelaceur à deux dimensions. L'information transmise sur chaque porteuse OFDM³ utilise les modulations différentielles ou cohérentes (D)8PSK, (D)QPSK ou (D)BPSK, complétées par un mode robuste qui ajoute de la redondance par répétition, permettant d'atteindre des débits physiques théoriques de l'ordre de 44 kbit/s en bande CENELEC A ou encore 180 kbit/s en bande FCC.

Au-dessus de la couche physique, la pile protocolaire, de conception modulaire, est construite sur la norme IEEE 802.15.4 [3], déjà largement utilisée dans le monde du sans fil, et sur la

couche d'adaptation 6LoWPAN⁴, définie dans une compilation de RFC publiées par l'IETF et assurant la compatibilité native avec le protocole IPv6. La recommandation G.9903 [1] fait référence au corpus de normes précité et l'amende (paramétrages, modifications ou extensions) selon les besoins techniques identifiés au sein de l'Alliance CPL G3.

La norme IEEE 802.15.4 [3] adaptée aux spécificités du CPL inclut notamment la méthode d'accès CSMA/CA⁵, et les politiques d'acquiescement et de retransmission des trames. Différents niveaux de qualité de service sont également proposés. Mais la couche MAC introduit surtout des extensions permettant à chaque nœud de communication CPL G3 de négocier avec l'ensemble des nœuds voisins les paramètres de communication : modulations proposées par la couche physique, définition des porteuses utilisées avec la fonction de *tone mapping*, etc. Le compromis débit/robustesse est donc sans cesse adapté aux conditions de communication du canal.



L'auteur

Cédric Chauvenet est diplômé de l'Ecole nationale supérieure en systèmes avancés et réseaux (ESISAR - groupe Grenoble INP). Il a réalisé une thèse sur la conception et le design d'une pile protocolaire IPv6 pour des réseaux de capteurs sur courant porteur en ligne (CPL) à l'université de Grenoble de 2010 à 2013. Il a ensuite travaillé pour la société NKE-Watteco sur des objets communicants utilisant des technologies basse consommation telles que LoRa (thèse CIFRE). Il a ensuite rejoint ERDF (désormais Enedis) en 2014 en tant qu'expert CPL pour le projet Linky. Depuis 2018, il est responsable de l'équipe CPL du projet Linky, et travaille au sein du « LinkyLab » sur des solutions innovantes permettant l'émergence des réseaux électriques intelligents, en particulier sur les sujets de l'intégration des véhicules électriques, l'intégration des énergies renouvelables, ou la gestion du stockage.

⁴ 6LoWPAN: IPv6 Low power Wireless Personal Area Networks (réseaux personnels sans fil à faible consommation).

⁵ CSMA/CA : Carrier Sense Multiple Access/Collision Avoidance

³ OFDM : Orthogonal Frequency-Division Multiplexing

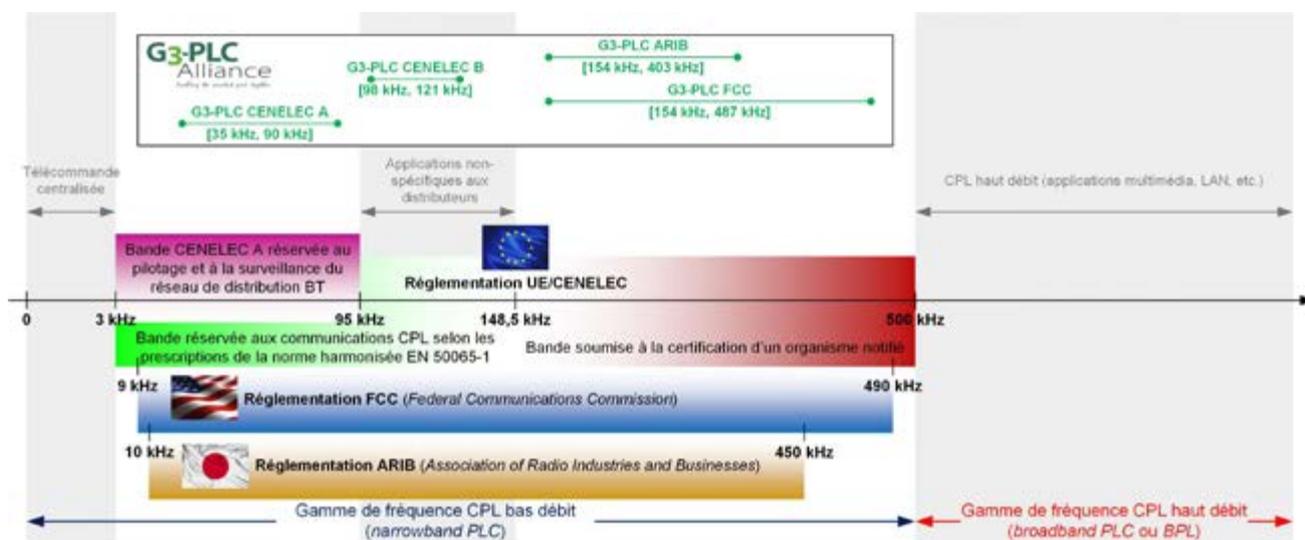


Figure 3 : Plans de fréquences CPL G3 relatifs aux différentes réglementations mondiales.

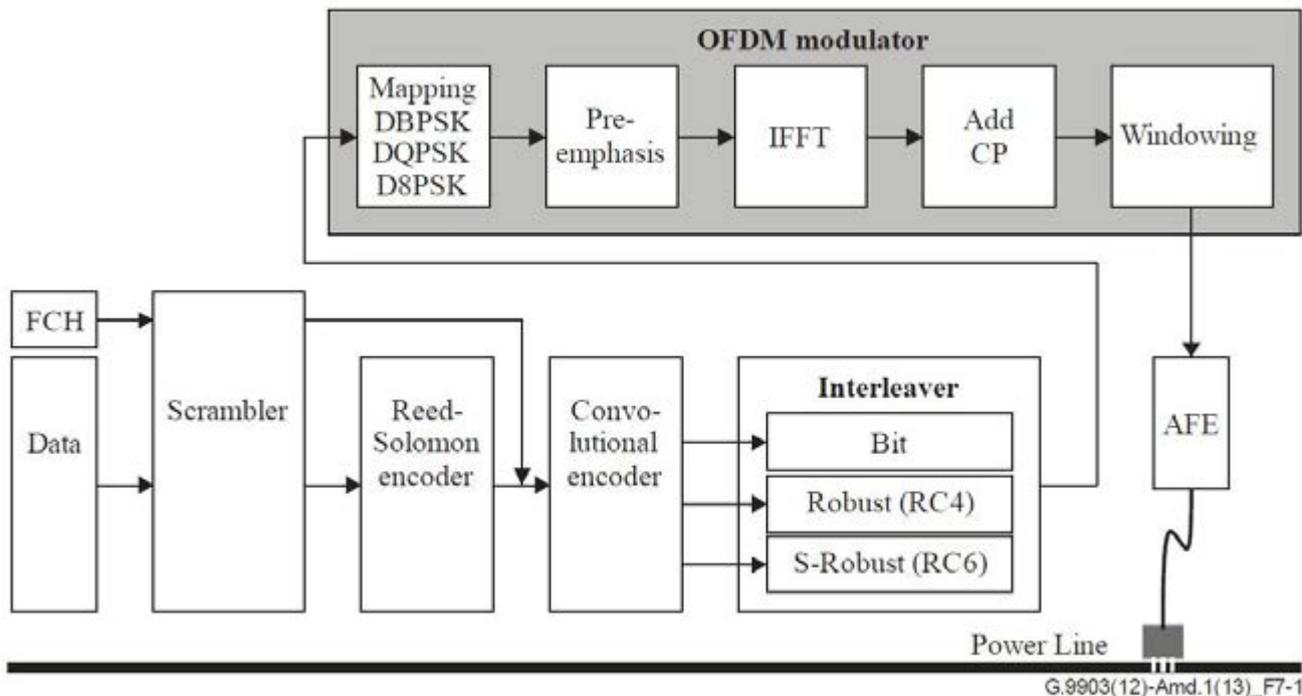


Figure 4 : Schéma bloc du transceiver OFDM CPL G3

- La couche d'adaptation 6LoWPAN introduit le protocole de routage réactif LOADng⁶ qui permet d'établir des chemins entre des paires de nœuds CPL G3 au sein d'un même réseau. Le protocole LOADng utilisé en *mesh under* – le routage est effectué pour chaque trame MAC – est le protocole de routage par défaut ; mais il est aussi possible de le désactiver pour laisser place à des alternatives, notamment un routage au niveau IP.

La pile protocolaire (figure 5) intègre également le chiffrement des données échangées au niveau MAC et un mécanisme d'authentification EAP-PSK permettant l'association sécurisée des nœuds rejoignant un réseau existant.

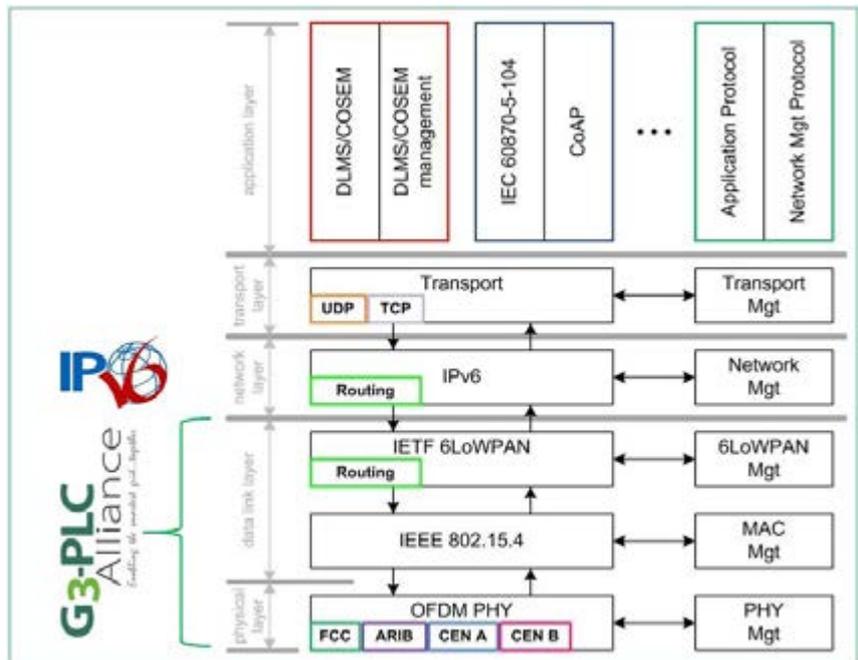


Figure 5 : Modularité de la pile protocolaire CPL G3

Enfin, le support du protocole IPv6 garantit pérennité et flexibilité à la pile CPL G3, qui s'interface à de nombreuses couches applicatives. Au-delà des déploiements de compteurs communicants, le CPL G3 est aussi déployé

industriellement en Italie dans le domaine du ferroviaire et demeure compatible avec de nombreux autres cas d'usage, notamment relatifs aux REI : chargement des véhicules électriques, gestion de l'énergie consommée dans l'habitation, contrôle de l'éclairage, etc.

Problématique de la CEM entre 2 et 150 kHz

Les risques liés à l'exposition aux champs électromagnétiques émis par le compteur Linky ont été très abondamment évoqués par les media et les réseaux sociaux. Les mesures effectuées par

⁶ LOADng : Lightweight On-demand Ad hoc Distance-vector Routing-Next Generation

l'ANFR sur Linky dont les résultats ont été publiés dans les rapports de celle-ci [4][5][6] montrent que la transmission des signaux CPL « ne conduit pas à une augmentation significative du niveau de champ électromagnétique ambiant ». En revanche, la question de l'absence de normes limitant les émissions conduites sur le réseau pour la plupart des équipements électriques dans la bande de fréquences 2-150 kHz et pouvant ponctuellement dégrader la communication CPL a eu un retentissement bien moindre. Un état des lieux est dressé ici, sans omettre d'évoquer les dernières avancées dans le monde de la normalisation.

Contexte général

Par nature, les CPL opèrent sur le support non-dédié que constitue le réseau électrique : les équipements CPL sont soumis à des variations incontrôlées des impédances d'accès (vue par le modem CPL) et du niveau de bruit dans les bandes de fréquences utilisées. Ainsi, l'industrie CPL s'est continuellement attachée à concevoir des technologies robustes capables de fonctionner dans l'environnement électromagnétique hostile propre au réseau électrique.

La croissance rapide de compteurs communicants intégrant des technologies CPL opérant essentiellement en bande CENELEC A, a attiré l'attention sur le quasi-vide normatif existant entre 2 et 150 kHz. Si le niveau d'émission des CPL est strictement limité par la norme européenne EN 50065-1 [7], ce n'est pas le cas de la grande majorité des appareils raccordés au secteur, à l'exception des éclairages à LED ou encore des plaques à induction. Malgré d'excellents résultats pour la collecte des compteurs, des cas d'interférence ont été relevés, notamment, par des experts actifs au CENELEC⁷ dont les travaux ont été publiés dans deux rapports techniques [8][9]. Ces interfé-

rences proviennent de la connexion au réseau de plus en plus de produits intégrant de l'électronique de puissance comme des variateurs de vitesse, des onduleurs pour la production décentralisée ou des alimentations à découpage.

Suite à ce constat, les travaux effectués au sein du comité technique IEC

niveaux d'émission dérivés des niveaux de compatibilité précités.

Vers de premières limites d'émission génériques entre 9 et 150 kHz

Les experts du groupe de travail JWG6 commun à l'IEC SC77A et au CISPR se dirigent vers un compromis visant d'abord à limiter la tension mesurée par bandes

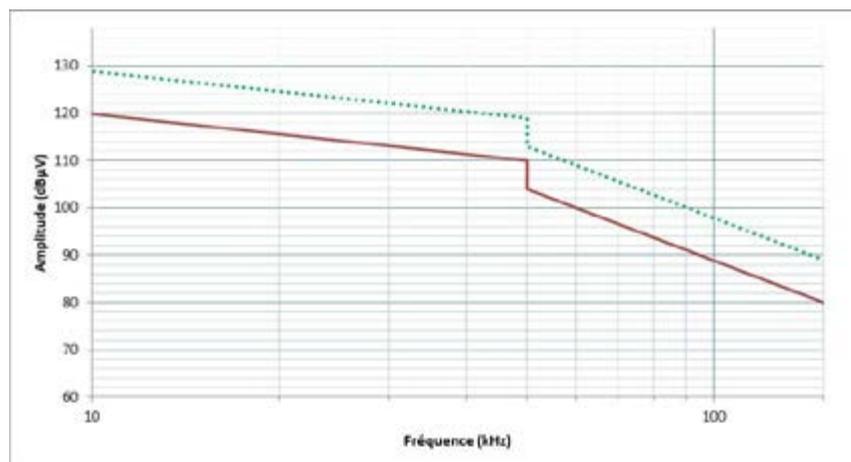


Figure 6 : Niveaux de compatibilité (en pointillés) et niveaux d'émission quasi-crête discutés au JWG6.

SC77A, responsable de la publication de plusieurs normes CEM harmonisées au niveau européen et donc rendues d'application obligatoire dans le cadre de la directive 2014/30/UE [10] pour tout produit ayant vocation à être commercialisé sur le marché unique, ont abouti à la publication des niveaux de référence entre 2 et 150 kHz dans la norme IEC 61000-2-2 [11]. Ces niveaux, dits « de compatibilité », visent à quantifier les niveaux de tension qui ne seront pas dépassés en 95 % des points du réseau BT, 95 % du temps (figure 6). Ils permettent par ailleurs de coordonner les niveaux d'émission et les niveaux d'immunité de tout produit raccordé au réseau.

Depuis, le CISPR⁸ œuvre conjointement avec l'IEC SC77A pour l'établissement d'une série de normes définissant des

de 200 Hz des émissions non intentionnelles de l'Équipement Sous Test (EST) au sens CISPR 16 [12] par translation des niveaux de compatibilité de l'IEC 61000-2-2 [11].

En second lieu, un accord sur les niveaux d'émission représentés en figure 6 est conditionné par l'introduction d'une seconde condition visant à limiter la densité spectrale des émissions non intentionnelles de l'EST par l'introduction du nouveau concept de « valeur intégrale », qui consiste à calculer la moyenne quadratique, sur une plage de fréquences prédéfinie, des différentes composantes en tension propres à chaque bande de 200 Hz. Le JWG6 travaille sur la validation de ce concept à travers une approche empirique pour établir la corrélation entre valeurs intégrales et performances de communication par CPL.

Ces travaux doivent ainsi aboutir aux premières limites d'émission génériques dans la bande 9-150 kHz applicables à

⁷ CENELEC : Comité européen de normalisation en électronique et en électrotechnique.

⁸ Comité International Spécial des Perturbations Radioélectriques.

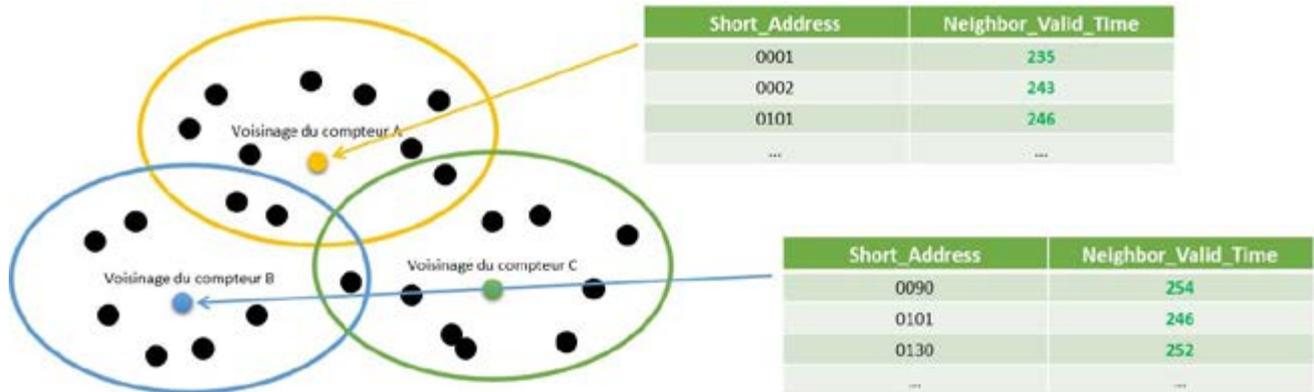


Figure 7 : Les tables des voisins ne révèlent aucune anomalie

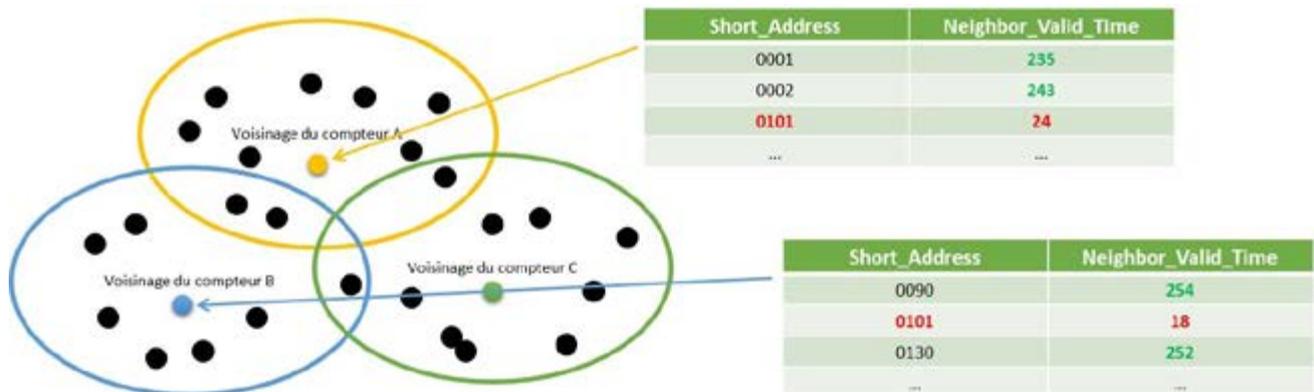


Figure 8 : Détection croisée d'expiration des paramètres de communication pour un même compteur

●●● tous les appareils raccordés au réseau BT, permettant une forte limitation des cas d'interférence avec les CPL, et plus largement la limitation des cas d'interférence entre tous types d'appareils électriques dans cette bande de fréquences.

Vers le smart grid de demain

Le CPL, un vecteur de nouveaux services

Au-delà des cas d'usage spécifiques aux compteurs communicants, la technologie CPL est un vecteur de nouveaux services du fait de la présence d'une connexion réseau, éventuellement IPv6, en tout point du réseau électrique.

Ainsi, le CPL constitue un formidable contributeur au développement des REI. Dans ce chapitre, on se propose

d'illustrer ce propos à travers les services réseau dérivés de l'infrastructure CPL Linky : la détection des coupures de courant, la détection de phase et la consolidation des données cartographiques.

La détection des coupures électriques

Aujourd'hui, la technologie CPL permet de détecter les coupures de courant en temps quasi-réel et donc de déclencher plus rapidement les interventions des équipes d'Enedis pour rétablir l'alimentation.

Comme exposé précédemment, l'une des forces du CPL G3 réside dans la connaissance du voisinage par chaque compteur. Chaque compteur Linky doit négocier périodiquement ses para-

mètres de communication CPL G3 en renseignant une base de données locale appelée « table des voisins ». Un usage secondaire, consistant à relever ces tables pour un nombre limité de compteurs ciblés, permet d'établir un diagnostic de l'état d'alimentation de tout un réseau BT en quelques secondes. Dans l'exemple suivant, le relevé des tables des voisins de trois compteurs permet de connaître l'état d'un réseau alimentant 28 clients.

Par rapport à une situation normale qui ne révèle aucune anomalie, illustrée en **figure 7** (les paramètres de communication ont été mis à jour récemment, comme l'indique le temps avant expiration « Neighbor_Valid_Time », proche de la valeur maximum de 255 minutes), la proche expiration des paramètres

“Chaque compteur Linky doit négocier périodiquement ses paramètres de communication CPL G3 en renseignant une base de données locale appelée « table des voisins ».”

de communication pour le compteur d'adresse courte 0x0101 dans les deux tables des voisins exposées en **figure 8** (le Neighbor_Valid_Time du compteur 0x0101 est faible et très inférieur au Neighbor_Valid_Time des autres compteurs), permet de suspecter une coupure de courant, car ces paramètres n'ont pas été mis à jour récemment.

Cette suspicion est d'autant plus vraisemblable que ce type de corrélation existe pour plusieurs tables des voisins et pour plusieurs compteurs : une zone entière du réseau serait alors non alimentée.

Le principe général exposé dans l'exemple est assez simple, mais l'efficacité du mécanisme de détection des coupures de courant requiert un choix judicieux des compteurs ciblés pour le relevé des tables de voisins et un choix adéquat des critères par lesquels une anomalie est effectivement suspectée.

La détection de phase

La détection des phases de rattachement des clients représente un réel levier pour l'exploitant du réseau. Le déséquilibre de phase est lié à l'évolution du réseau dans le temps avec l'arrivée de nouveaux raccordements, le changement des puissances des installations ou encore la modification de la topologie du réseau de distribution. Il est par ailleurs limité à 2 % par la norme EN 50160 [13], qui prescrit les caractéristiques de la tension fournie par les réseaux publics de distribution. Au-delà du risque de violation de ces prescriptions obligatoires, puisqu'elles engagent contractuellement le distributeur, le déséquilibre de phase peut mener à la dégradation de fourniture avec l'augmentation des niveaux harmoniques, des variations de la tension, le vieillissement

prématuré de certains composants du réseau, et la défaillance d'équipements voire de tout un processus industriel.

Il est déjà possible de remédier à de possibles déséquilibres par le changement de phase d'installations existantes mais ces actions sont généralement ponctuelles en cas de problème avéré. Elles nécessitent de plus l'installation d'outils dédiés permettant aux techniciens d'effectuer le diagnostic et d'être guidés dans la résolution du problème. Désormais, les CPL des compteurs Linky changent la donne.

différemment raccordés entre le conducteur de neutre et l'une des trois phases. En CPL G3, la détection de phase se fait par la détection du passage par zéro sur les fronts montants de l'onde de tension 50 Hz sur lesquels un compteur de 8 bits est synchronisé comme le montre la **figure 9**.

Pour chaque modem CPL G3, la valeur de ce compteur 8 bits est une information disponible en permanence localement et est insérée dans l'entête de toute trame CPL G3 transmise. Ainsi, lorsqu'un modem (TX) transmet une trame à un modem (RX), ce dernier récupère la valeur du compteur du transmetteur (cTX) issue de la trame reçue et la valeur de son propre compteur (cRX) au même instant. La différence ($cRX - cTX = 170$ en figure 9) permet de retrouver le déphasage entre les deux modems (en figure 9, TX est déphasé de 240° ou -120° par rapport à RX).

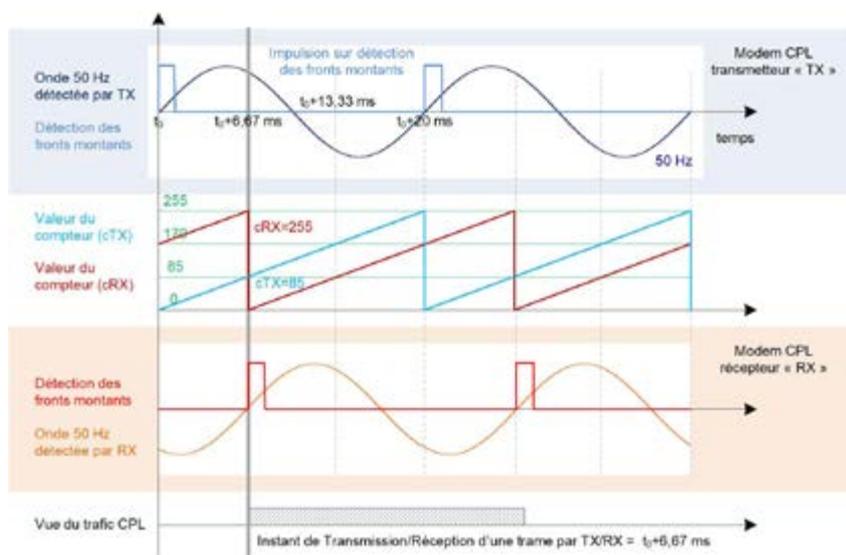


Figure 9 : Représentation en fonction du temps des valeurs des compteurs 8 bits (cTX et cRX) et des ondes de tension 50 Hz détectées par deux modems CPL G3 (TX et RX) déphasés de 120°

Lors de sa propagation sur le réseau triphasé, le signal CPL peut aisément passer d'une phase à une autre du fait de la proximité des conducteurs au sein d'un même câble. Le réseau triphasé est ainsi vu comme un canal de propagation unique partagé par les compteurs communicants, majoritairement monophasés, in-

Dans sa table des voisins, un compteur CPL G3 maintient alors en permanence la valeur de son déphasage relatif avec ses voisins. La collecte des tables des voisins de tous les compteurs d'un réseau BT permet, via la résolution d'un système d'équations, de retrouver les phases de raccordement des différents

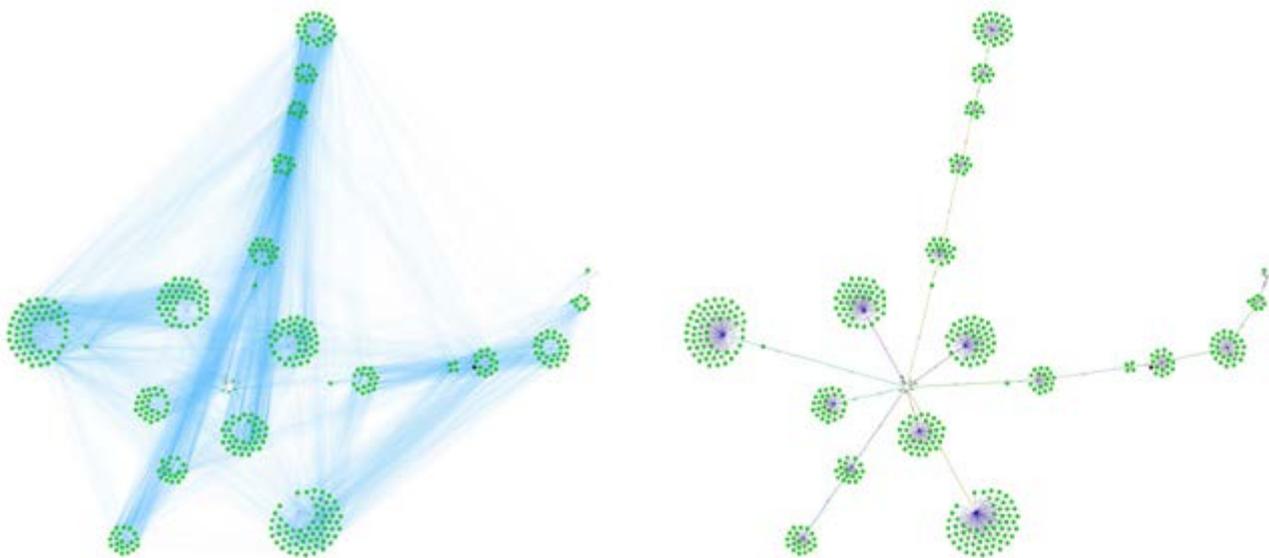


Figure 10 : Ensemble des liens existants entre nœuds CPL G3 (gauche) et chemins sélectionnés par le protocole de routage (droite) au sein d'un même réseau

- compteurs par rapport à la référence que constitue le concentrateur.

Avec l'arrivée des 35 millions de compteurs Linky, Enedis est maintenant en mesure de prévenir le déséquilibre de phase par la détection automatisée des phases de raccordement des clients. Des interventions correctives peuvent ainsi être planifiées et cibler les réseaux les plus sensibles, suivies de la mise à jour et correction des bases de données patrimoniales.

La consolidation des données cartographiques

Un troisième service à valeur ajoutée permis par le CPL G3 réside dans la consolidation des données cartographiques d'Enedis. L'évolution du réseau électrique dans le temps est un réel défi pour maintenir à jour les données cartographiques.

Les tables de voisins CPL G3 apportent également de nouvelles possibilités en ce domaine : le **figure 10** (gauche) correspond à une représentation graphique des liens existant (en bleu) entre les différents nœuds CPL G3 (compteurs en vert, concentrateur en blanc). Si cette figure représente une superposition des liens CPL viables relevés à des instants

“Avec l'arrivée des 35 millions de compteurs Linky, Enedis est maintenant en mesure de prévenir le déséquilibre de phase par la détection automatisée des phases de raccordement des clients.”

distincts, elle témoigne de la diversité des liens en tout instant, et de la variabilité des conditions de propagation.

La figure 10 (gauche) représente aussi l'étendue des possibles du point de vue des échanges de données entre nœuds CPL G3. C'est ensuite le protocole de routage LOADng qui vient sélectionner les liens les plus avantageux selon la métrique utilisée, qui prend ici en compte la qualité des liens ou encore le nombre de nœuds intermédiaires nécessaires entre l'émetteur et le destinataire. La topologie résultant de l'action du protocole de routage est représentée en figure 10 (droite). Les nœuds intermédiaires sont représentés par des points bleus.

Il est à noter que cette topologie évolue au cours de la vie du réseau CPL G3, notamment avec la variation des qualités de lien. L'étude de ses évolutions sur

plusieurs dizaines de jours révèle que certains chemins et donc certains liens sont plus utilisés que d'autres. Lorsque la confrontation des chemins fréquemment utilisés et des données cartographiques existantes révèle des disparités, alors une erreur de cartographie est suspectée.

Les vérifications réalisées in situ ont depuis permis de valider la présence d'erreurs de cartographie en détectant les rattachements électriques à la maille du départ BT, voire le rattachement des clients en configuration résidentielle collective (alors qu'Enedis s'apprête à récupérer la concession des colonnes montantes dans le cadre de la loi ELAN). Ici encore, l'analyse de données relatives aux paramètres de communication du CPL, permettra d'enrichir le spectre des outils au service des cartographes des exploitants de réseau utilisant la technologie CPL G3.

Exemple du CPL sur la moyenne tension

Le CPL a été mis en œuvre sur la moyenne tension (MT) dans le cadre du démonstrateur SOGRID. Ce projet innovant a mobilisé une dizaine de partenaires industriels et académiques entre 2013 et 2015 pour expérimenter la mise en œuvre d'une chaîne de communication IPv6, exclusivement portée par CPL G3, couvrant l'ensemble du réseau public de distribution BT et MT au service d'une sélection de cas d'usages REI :

- mesures de courant et de tension en différents points du réseau MT et BT ;
- contrôle de la topologie du réseau MT ;
- localisation de défauts sur le réseau MT ;
- comptage communicant sur le réseau BT et backhauling des données collectées sur la MT ;
- communication IPv6 de bout-en-bout entre le système d'information et les nœuds CPL G3 installés en MT ou BT ;

- supervision des fonctions télécom des objets communicants CPL G3.

Sur le segment BT, SOGRID emploie une infrastructure de comptage inspirée par Linky mais distincte des nouveaux compteurs d'Enedis.

Architecture de l'infrastructure télécom CPL G3 du projet SOGRID

Pour assurer la couverture des réseaux MT et BT par la technologie CPL G3, des routeurs sont installés en différents points du réseau comme illustré en **figure 11**.

Sur la MT, un routeur d'accès (border router) installé en poste source (primary substation) en aval de chaque transformateur assure la connectivité sur une dorsale (Medium Voltage – MV – backbone) du FAN (Field Area Network). Le routeur d'accès FAN fait donc l'interface entre le CPL G3 MT et un lien télécom tiers dédié aux échanges d'information entre les systèmes d'information (SI) et le poste source. Sur la BT, des routeurs d'accès assurent la connectivité CPL G3 entre le poste de distribution (secondary substation) et les compteurs du projet SOGRID :

les NAN (Neighbourhood Area Network). Le routeur d'accès NAN fait l'interface entre le CPL G3 BT et le CPL G3 MT.

Les routeurs d'accès (FAN ou NAN) permettent une connectivité IPv6 entre les SI : le MDMS (Meter Data Management System) utilisé pour la collecte et le traitement des données de comptage et le SCADA (Supervisory Control And Data Acquisition) pour les cas d'usage liés à l'automatisation du réseau.

En ce qui concerne les objets communicants déployés, les NAN sont constitués exclusivement de compteurs et le FAN regroupe les routeurs d'accès NAN ainsi que des capteurs et actionneurs tels que les organes manoeuvrables télécommandés (OMT ou MV switch gear). Les OMT ont la fonction de changer la topologie du réseau MT, par exemple en cas de défaut ou de travaux planifiés.

Réalisations et difficultés

Pour réaliser les cas d'usage expérimentés dans le projet SOGRID, trois profils applicatifs rappelés en **figure 12** partagent une même pile protocolaire CPL G3 sur le réseau MT.

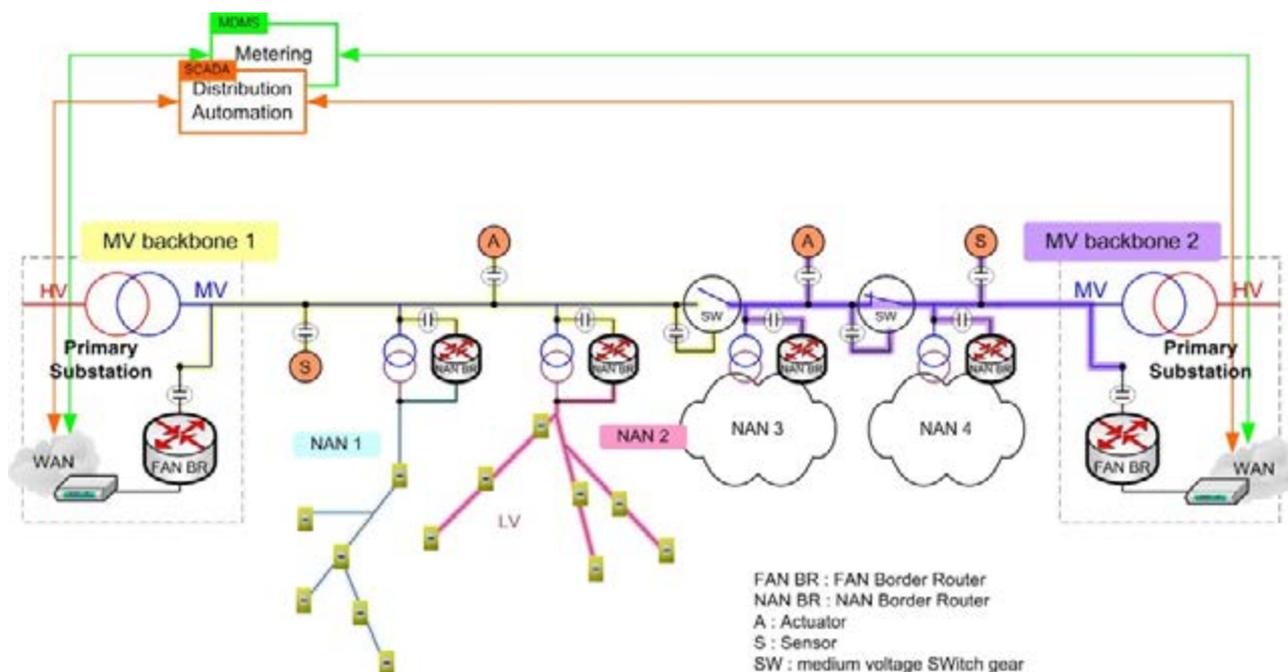


Figure 11 : Architecture de l'infrastructure télécom CPL G3 du projet SOGRID.

“Les spécificités du réseau MT représentent autant de défis à relever pour la mise en œuvre d’une infrastructure CPL G3 fiable et performante.”

●●● Le protocole IEC 61870-5-104 (TCP) est relatif à l’automatisation du réseau, DLMS/COSEM (UDP) au comptage et CoAP (UDP) est utilisé pour la supervision télécom des matériels déployés. Les couches basses sont identiques, avec un routage LOADng qui s’effectue en route over (soit au niveau IP) et le choix de la bande de fréquence 154-487 kHz pour la transmission des données sur la MT. En revanche, en BT, seul le protocole applicatif DLMS/COSEM est utilisé, en s’appuyant sur le routage par défaut (LOADng en mesh under) et une transmission en bande CENELEC A, en tous points identiques à la pile protocolaire Linky.

Les spécificités du réseau MT représentent autant de défis à relever pour la mise en œuvre d’une infrastructure CPL G3 fiable et performante.

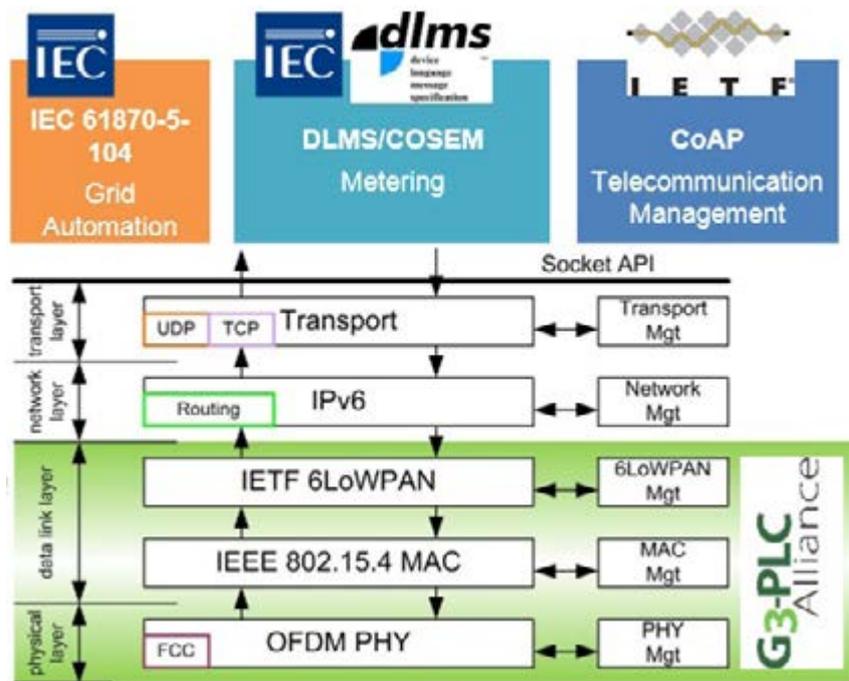


Figure 12 : Profils de communication CPL G3 MT utilisés dans le projet SOGRID

Le caractère dynamique de la topologie du réseau MT a été le premier obstacle à franchir pour garantir une connectivité CPL G3 robuste aux changements des schémas d’exploitation du réseau MT. Le scénario décrit en **figure 13** montre l’évolution souhaitée de la couverture CPL G3 dans le temps en cas de manœuvres successives sur les OMT SW2 et SW3 qui ont pour effet l’interruption temporaire de l’alimentation électrique de portions de réseau MT, et donc l’interruption physique de la continuité du canal de propagation du signal CPL.

Du fait de « l’étanchéité » des deux réseaux CPL G3 MV backbone 1 et MV backbone 2 (les nœuds des deux réseaux ne peuvent pas se voir simultanément) superposés chacun avec une ligne MT distincte, il a fallu concevoir un mécanisme de bascule rapide des nœuds vers l’un ou l’autre des deux réseaux (cf. [14]).

En deuxième lieu, sur le plan de la propagation physique, des matériels de couplage performants ont dû être conçus pour assurer la couverture sur des distances de quelques kilomètres sans répéteurs intermédiaires. Les modes de propagation et de couplage du signal CPL doivent également faire l’objet de choix judicieux afin de couvrir les trois phases sur des réseaux souterrains (majoritairement urbains) et des réseaux aériens (essentiellement ruraux). La mise en œuvre de circuits d’adaptation d’impédance (Line Matching Units) est essentielle pour pouvoir maximiser la puissance transmise sur le canal.

Ainsi, pour la première fois le CPL G3 a été utilisé avec succès pour le transport de données issues d’applications métiers hétérogènes, à l’image d’un réseau informatique classique utilisé à la fois pour le courrier

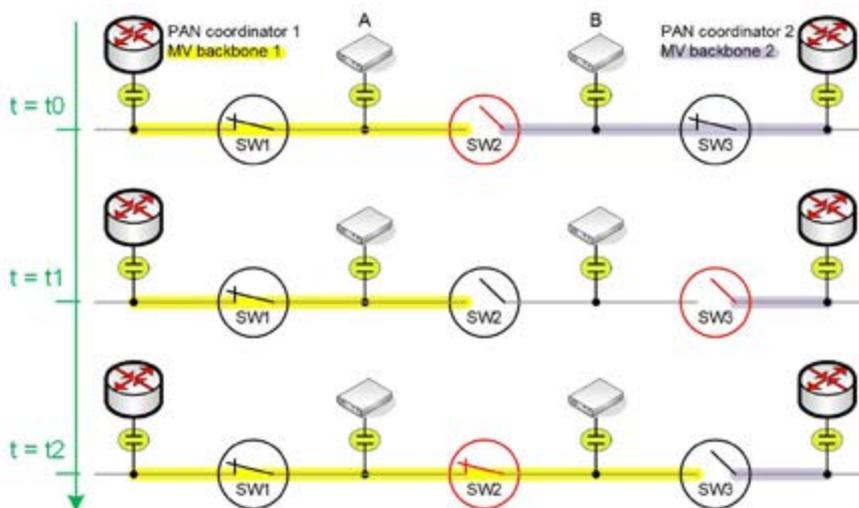


Figure 13 : Illustration du caractère dynamique du réseau MT

électronique, le streaming vidéo ou encore la navigation sur Internet. Le projet SOGRID n'a pas été suivi d'un déploiement à échelle industrielle, mais il a créé un précédent pouvant nourrir de futurs projets mettant à profit la modularité de la pile protocolaire CPL G3 mais aussi sa polyvalence.

Nouvelles tendances technologiques pour l'évolution des CPL bande étroite

Optimisation de l'existant

Comme pour tout composant, le déploiement à grande échelle d'une première version arrivée à maturité industrielle est suivi d'une phase d'optimisation, renforçant ainsi les possibilités d'évolution du système existant. En d'autres termes, l'augmentation des performances du CPL pour les cas d'usage existants permettra de libérer davantage de bande passante pour de nouveaux services à valeur ajoutée dans le domaine du comptage, mais aussi partagée avec d'autres applications comme démontré dans le projet SOGRID.

L'Alliance CPL G3 s'attèle à cette tâche qui, de son point de vue, passe essentiellement par la minimisation du trafic dit « de contrôle ». Ces travaux passent, entre autres, par la réalisation d'études paramétriques permettant de déterminer avec quelle configuration la pile protocolaire CPL G3 sera la plus performante. Le comportement des mécanismes d'accès au médium pour de nombreux accès concurrents, ou le compor-

l'une des priorités pour garantir de nouvelles perspectives de développement aux technologies CPL bande étroite.

Hybridation entre technologies CPL et radio

Au sein des REI, les technologies de télécommunications occupent une place prépondérante : de multiples solutions concurrentes sont promues par des industriels pour répondre aux différents cas d'usage. L'utilisateur final est ainsi confronté au choix d'une ou plusieurs solutions de télécommunication pour trouver l'optimum technico-économique sur la base de nombreux critères d'analyse. Dans ce contexte, les réseaux dits contraints, de par leur faible coût et leur faible consommation d'énergie, constituent souvent le choix final des utilisateurs gérant un parc important d'objets connectés. Pour répondre à cette demande, les fournisseurs de solutions opposent très souvent les technologies radio bas débit (série IEEE 802.15.4, WiSUN, LoRaWAN, etc.) et les technologies CPL bas débit (CPL G3, CPL G1, Meters & More, PRIME, etc.).

Au-delà de l'opposition frontale entre technologies concurrentes, il existe cependant un intérêt intuitif à combiner les avantages des media de communication radio et CPL. Ceci a été identifié précocement par certains industriels mais le marché des technologies hybrides était encore peu mature. Cependant, un autre paysage industriel se dessine courant 2019. L'essor naissant des solutions hybrides CPL/radio basées sur le

été présentée lors de la conférence par la société Andrea Informatique, Enedis et EDF R&D.

L'industrialisation d'une solution hybride doit désormais passer par la publication d'une norme pour permettre la mise sur le marché d'une solution compatible avec le CPL G3 dont le déploiement pourrait, entre autres, être envisagé sur les nouveaux marchés de comptage communicant en Asie.

Conclusion

Les CPL bande étroite sont une technologie ancienne, mais, paradoxalement, ils connaissent leur premier véritable essor avec l'avènement récent des REI et de l'une de leurs briques fondamentales : les systèmes de comptage communicant.

C'est bien dans l'ère de l'IoT, un concept dont les technologies CPL se nourrissent, qu'ils deviennent une réalité industrielle déployée à grande échelle pour les prochaines décennies. Les 35 millions de compteurs Linky en cours de déploiement par Enedis l'illustrent parfaitement. Il convient également de citer d'autres projets européens pilotés par les distributeurs Iberdrola ou Enel, et les choix technologiques effectués sur d'autres continents à l'instar de la promotion de la technologie Hi-PLC (qui se rapproche plutôt du CPL haut débit) par le géant chinois SGCC.

Si de nombreux défis ont dû être surmontés pour que les CPL bande étroite arrivent à maturité industrielle, leur avenir se construira sur leur capacité à prendre en compte des besoins futurs et à s'intégrer dans le mix télécom des réseaux électriques intelligents. Les parties prenantes ont conscience de ces enjeux et préparent déjà les prochaines grandes évolutions technologiques pour tirer parti au maximum des infrastructures existantes, fournissant un accès télécom en tout point du réseau électrique ! ■

Cédric Lavenu

Ingénieur chercheur, EDF R&D, France

Cédric Chauvenet

Manager de l'équipe CPL, Enedis, France

“Au sein des REI, les technologies de télécommunications occupent une place prépondérante.”

tement du protocole de routage et la stabilité des routes qu'il engendre, font également partie des éléments à étudier pour améliorer les performances du CPL G3.

Le traitement de la problématique de passage à l'échelle, liée à l'accroissement du nombre de nœuds communicants au sein d'un même réseau CPL, apparaît comme

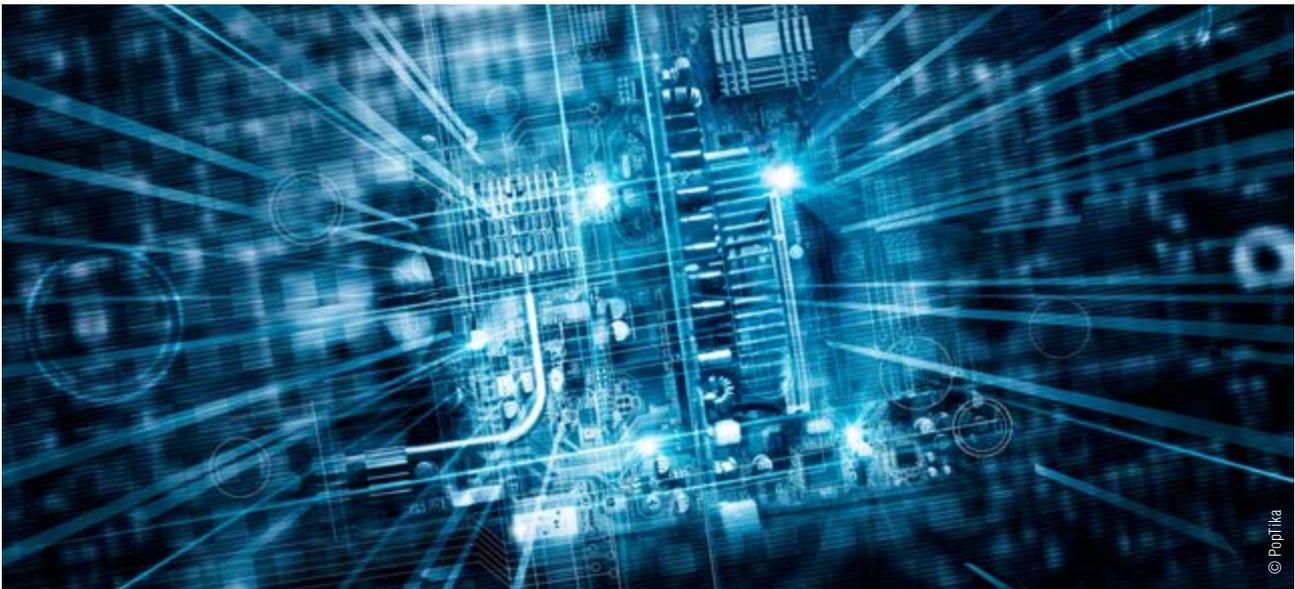
CPL G3 s'est confirmé lors de la conférence European Utility Week en novembre 2019 avec l'arrivée de solutions industrielles : les compteurs ADDAX de ADD Grup (expérimentations en cours) ou encore les puces des fondeurs ST Microelectronics et Vertexcom (Chine). Une maquette démontrant la mise en œuvre d'une technologie hybride CPL G3/radio IEEE 802.15.4 [15] a aussi

Résumé

Les courants porteurs en ligne bande étroite sont une technologie ancienne, mais, paradoxalement, ils connaissent leur premier véritable essor avec l'avènement des REI. C'est bien dans l'ère de l'IoT dont se nourrissent les CPL, qu'ils deviennent une réalité industrielle. Comme le traite cet article pour la technologie CPL G3, déployée en France par Enedis dans 32 millions de compteurs Linky, de nombreux défis ont été surmontés pour atteindre une maturité technologique à l'épreuve du temps. ■

Abstract

Narrowband powerline communication is an ancient technology, but, paradoxically, PLC technologies started to blossom with the advent of the smart grid. Fed by the concepts of the IoT era, PLC became an industrial reality. This paper handles the challenges having been addressed to reach maturity and durability through the example of the G3-PLC technology, rolled out in 32 million Linky smart meters by French utility Enedis. ■



Bibliographie

- [1] Recommendation ITU-T G.9903 (08/2017): Narrowband Orthogonal Frequency Division Multiplexing Power Line Communication Transceivers for G3-PLC Networks – disponible à l'adresse : <http://www.itu.int/rec/T-REC-G.9903/en>
- [2] Recommendation ITU-T G.9901 (04/2017): Narrowband Orthogonal Frequency Division Multiplexing Power Line Communication Transceivers – Power Spectral Density Specification – disponible à l'adresse : <http://www.itu.int/rec/T-REC-G.9901/en>
- [3] IEEE 802.15.4 : IEEE Standard for Information technology – Telecommunications and information exchange between systems – Local and metropolitan area networks – Specific requirements Part 15.4: Wireless Medium Access Control (MAC) and Physical Layer (PHY) Specifications for Low-Rate Wireless Personal Area Networks (WPANs) – 2006
- [4] Rapport technique sur les niveaux de champs électromagnétiques créés par les compteurs Linky, VOLET 1 : mesures en laboratoire, ANFR, mai 2016
- [5] Rapport technique sur les niveaux de champs électromagnétiques créés par les compteurs Linky, VOLET 2 : mesures complémentaires en laboratoire, ANFR, septembre 2016
- [6] Rapport technique sur les niveaux de champs électromagnétiques créés par les compteurs Linky, VOLET 3 : mesures sur le terrain, ANFR, septembre 2016
- [7] EN 50065-1 : Transmission de signaux sur les réseaux électriques basse tension dans la bande de fréquences de 3 kHz à 148,5 kHz – Partie 1 : règles générales, bandes de fréquences et perturbations électromagnétiques
- [8] CLC/TR 50627:2015 : Study Report on Electromagnetic Interference between Electrical Equipment/Systems in the Frequency Range Below 150 kHz
- [9] CLC/TR 50669:2017 : Investigation Results on Electromagnetic Interference in the Frequency Range below 150 kHz
- [10] Directive 2014/30/UE : DIRECTIVE 2014/30/UE DU PARLEMENT EUROPÉEN ET DU CONSEIL du 26 février 2014 relative à l'harmonisation des législations des États membres concernant la compatibilité électromagnétique (refonte) – <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/FR/TXT/PDF/?uri=CELEX:32014L0030&from=EN>
- [11] IEC 61000-2-2 : Compatibilité électromagnétique (CEM) - Partie 2-2 : environnement - Niveaux de compatibilité pour les perturbations conduites à basse fréquence et la transmission des signaux sur les réseaux publics d'alimentation basse tension
- [12] CISPR 16 : Spécification des méthodes et des appareils de mesure des perturbations radioélectriques et de l'immunité aux perturbations radioélectriques
- [13] EN 50160 : Caractéristiques de la tension fournie par les réseaux publics de distribution
- [14] Innovative solution sustaining supervisory control and data acquisition to remote terminal unit G3-PLC connectivity over dynamic grid topologies, Cédric Lavenu, Damien Dufresne, Xavier Montuelle, 24th International Conference & Exhibition on Electricity Distribution (CIRED), Juin 2017
- [15] IEEE 802.15.4g : IEEE Standard for Local and metropolitan area networks--Part 15.4: Low-Rate Wireless Personal Area Networks (LR-WPANs) Amendment 3: Physical Layer (PHY) Specifications for Low-Data-Rate, Wireless, Smart Metering Utility Networks – 2012



Bruno Meyer

est chargé de mission à RTE. Il a rejoint le groupe EDF en 1985 et y a exercé différentes fonctions d'expertise et de direction. Il a été directeur général d'ARTERIA de 2011 à 2016. Il est Fellow de l'IEEE, membre émérite et vice-président de la SEE dont il anime le conseil scientifique et technique.

L'open source : qui paye pour les logiciels libres ?

Les logiciels en open source, apparus à la fin des années 1990, ont profondément marqué le paysage de l'informatique. Leurs vertus proclamées et leur modèle économique continuent à faire débat. Qui paye en définitive pour eux ?

Le logiciel libre : une apparition controversée

Depuis qu'est apparu le logiciel libre, ou Open source¹, à la fin du siècle dernier, on a vu se développer et cohabiter différentes communautés. Si la majorité des utilisateurs de logiciels en ignore même l'existence, les spécialistes s'affrontent. Les adeptes et militants d'un côté, les sceptiques de l'autre. Robert Metcalfe, le respecté et iconoclaste père de l'Ethernet, n'avait-il pas qualifié l'open source « d'idéologie utopique » et de « balivernes utopiques » qui rappelaient le communisme ? Pour reconnaître plus tard s'être fourvoyé...

Depuis deux décennies, la communauté du logiciel libre s'est élargie et le rachat l'an passé par IBM, pour 34 milliards de dollars, de Red Hat, géant du logiciel libre, a marqué les esprits. Ainsi l'open source joue-t-il

à présent dans la cour des grands ; mais s'il est libre, il a néanmoins un prix...

De bonnes raisons d'y croire...

Pour ses partisans, le logiciel libre est avant tout un état d'esprit. En cela, l'analyse première de Robert Metcalfe était pertinente. Les adeptes de l'open source y voyaient une manière de s'affranchir des géants du logiciel à une époque où l'on ne parlait pas encore de GAFAM mais où Microsoft et Apple dominaient, dans une position proche du monopole, le marché des logiciels bureautiques, y compris celui des systèmes d'exploitation.

“Pour ses partisans, le logiciel libre est avant tout un état d'esprit.”

¹ Les désignations *logiciel libre* et *open source* sont deux désignations concurrentes d'un même type de licence de logiciel. En utilisant la désignation logiciel libre, on tient à mettre en avant la finalité philosophique et politique de la licence, tandis que la désignation open source met l'accent sur la méthode de développement et de diffusion du logiciel
Source : Wikipedia.

Mais derrière la bannière audacieuse, un argumentaire solide, innovant et pionnier s'est forgé. Le fait que le logiciel soit libre garantit que le développeur ne pourra pas sciemment masquer un défaut ou ●●●

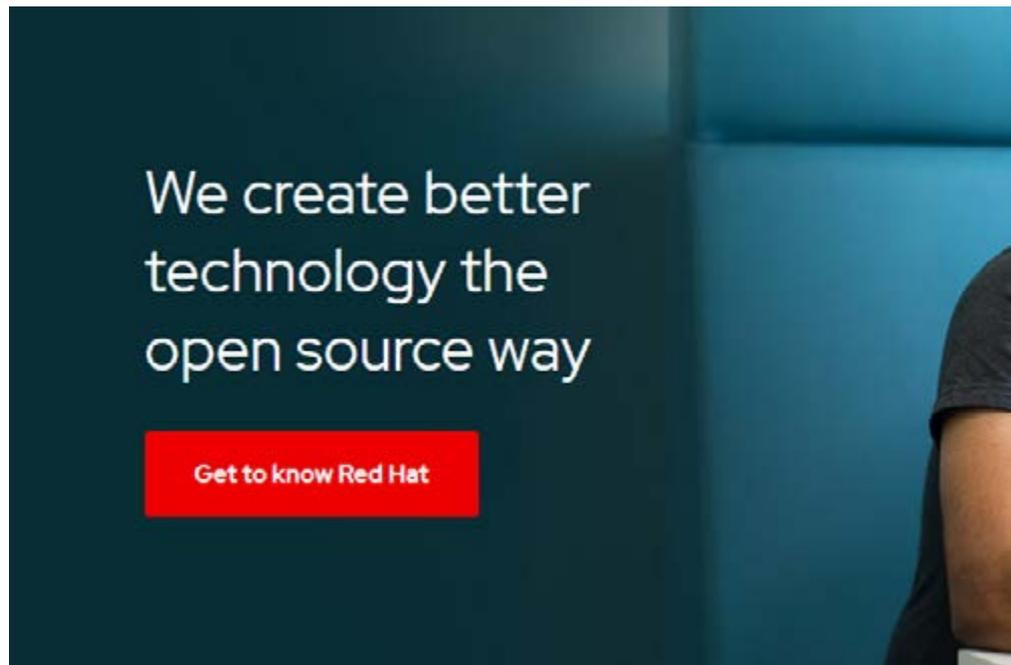
●●● un bug, voire avoir une approche biaisée dans ses produits. Un autre avantage du logiciel libre est de maîtriser les diffusions des nouvelles versions de logiciels. Certains lecteurs de ces lignes se rappelleront peut-être de situations où ils ont été contraints par leur fournisseur de faire une mise à jour irréversible de systèmes d'exploitation pour constater que celle-ci s'avérait incompatible avec les autres logiciels déjà installés sur leur ordinateur ou leur téléphone.

Au sein de la vaste communauté d'utilisateurs qui n'ont aucune propension à regarder le contenu du code – qu'au demeurant ils seraient incapables de comprendre ou de modifier – existe une communauté d'experts qui font vivre ces logiciels libres. Cette confrérie, au départ constituée d'un noyau de spécialistes, se structure en général ensuite en groupes spécialisés, afin de partager les problèmes à résoudre ou les développements à effectuer. Quant au contrôle de la qualité, dans une analogie parlante quoiqu'approximative, on pourrait comparer ces développements à l'encyclopédie Wikipédia, dont la justesse des entrées est contrôlée en permanence par l'ensemble de ses utilisateurs.

Ces ensembles de développeurs de logiciels libres forment ainsi des communautés soudées et étendues. Il en existe de nombreuses, regroupées par logiciels, par pays, ou tout simplement transverses à ce qui touche à l'open source. Citons, parmi tant d'autres, l'Association francophone des utilisateurs de logiciels libres, dont la devise est tout un programme : Liberté, Pérennité, Interopérabilité !

... et d'autres de s'en méfier...

S'il est arbitraire de dresser une hiérarchie entre les familles de logiciels, on peut à minima en distinguer deux classes. Ceux pour lesquels des erreurs ou des pannes peuvent être gênantes mais sans nécessiter un dépannage immédiat. D'autres, en revanche, pour lesquels une défaillance peut provoquer des catastrophes. Le terrain fertile pour les logiciels libres se trouvait à l'origine dans la première de ces



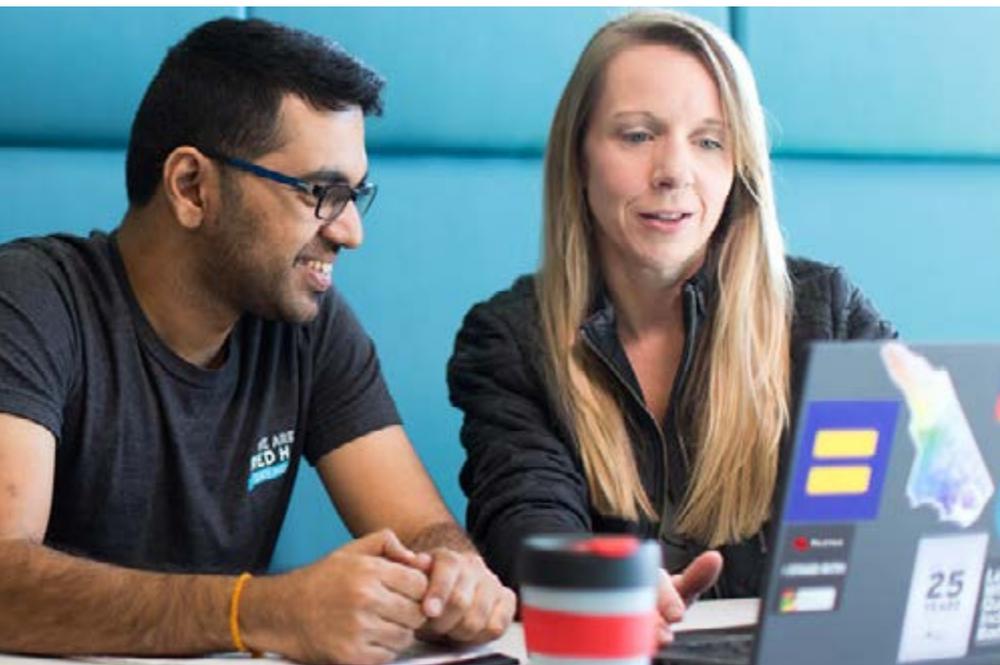
■ La Linux Foundation regroupe une communauté désireuse de poursuivre le développement de logiciels libres sur une variété de domaines. (Source : Linux Foundation, <https://www.linuxfoundation.org/>)

catégories. En effet, outre que les contraintes peuvent être estimées comme limitées, on peut tabler sur le principe que des correctifs seront vite proposés par les développeurs et que le temps nécessaire pour corriger l'erreur ne sera pas critique. Rien de tel pour la classe de logiciels pour lesquels les conséquences d'erreurs de codage peuvent avoir des conséquences majeures en termes de pertes humaines, de dommages à la sécurité ou à l'économie d'un pays ou encore de pertes financières inacceptables. Des systèmes extrêmement critiques existent dans le spatial, la défense, l'aéronautique, l'énergie, les transports... Tout nouveau développement y fait l'objet de spécifications, de maquettes, de prototypes, de tests et autres versions-bêta avant d'être utilisé en mode opérationnel. On peut douter que la NASA eût fait appel à des logiciels libres pour le lancement d'Apollo 11. Ce qui n'empêcha pas le célèbre code d'erreur 1202 d'apparaître lors de l'alunissage, mais l'informaticienne responsable du logiciel, Margaret Hamilton, l'ayant identifié, elle put ainsi donner un avis qualifié pour que l'alunissage ait lieu. A propos de cette aventure, il est intéressant de noter que la NASA a ensuite « libéré » le code source pour la plus grande joie de la communauté des informaticiens.

Outre la question cruciale de la qualité, les logiciels critiques doivent offrir les meilleures protections possibles contre les attaques malveillantes. L'actualité des dernières décennies montre que même les logiciels propriétaires font l'objet de cyberattaques de sources variées ; on peut légitimement craindre que l'utilisation de logiciels libres ne rende ces systèmes plus vulnérables. Une opinion aujourd'hui dominante dans le monde industriel est que l'adoption de logiciels libres pour des développements critiques ouvre une brèche inacceptable dans la sécurité de projets tout entiers.

Une dynamique mondiale

Linux constitua donc un des pionniers des logiciels libres. Le système d'exploitation développé par le Finlandais Linus Torvalds était à l'origine une alternative au système d'exploitation Unix, très répandu dans les années 1990 (les plus anciens de nos lecteurs se rappelleront des « stations de travail » d'Antan, Sun, Apollo et autres chers disparus). Torvalds s'inspira lui-même d'un système développé par Richard Stallman baptisé GNU, avec une cible claire : GNU's Not Unix. Unix a pratiquement disparu, mais l'acronyme GNU reste associé au monde du logiciel libre. Linux est donc parmi les pionniers,



“Le navigateur Firefox développé par des bénévoles et géré désormais par la société Mozilla fait partie des champions de l’open source.”

avec une réputation de qualité solidement établie. Alors, pour reprendre une question célèbre, Linux, combien de divisions ? Une réponse fiable est difficile, selon que l’on inclut ordinateurs ou aussi téléphones. Mais les plus fervents zélotes ne tablent pas sur plus de quelques pourcents du nombre total d’utilisateurs.

Le navigateur Firefox développé par des bénévoles et géré désormais par la société Mozilla fait partie des champions de l’open source. C’est l’un des logiciels libres préconisés par l’État français dans le cadre de la modernisation de ses systèmes d’information. Après avoir été il y a dix ans leader sur le marché européen, il reste aujourd’hui, selon les études de marché, le deuxième ou troisième navigateur le plus utilisé au monde.

On trouve également de l’open source dans les protocoles d’échanges d’information sé-

curisés entre ordinateurs ; notamment dans les implémentations de TLS (Transport Layer Security) et de son prédécesseur SSL (Secure Socket Layer). Sans les détailler ici, indiquons que l’objectif de ces protocoles est d’assurer des échanges d’informations sécurisés entre ordinateurs. Ces implémentations ont choisi le modèle de l’open source par méfiance à l’égard de systèmes propriétaires dont les contenus n’auraient pu être analysés par les utilisateurs.

En complément de ces géants du logiciel libre, d’autres exemples existent à foison et voient le jour dans le monde entier en adoptant la philosophie originelle. EDF a ainsi choisi l’open source pour développer son code de calcul de structures, Aster, avec des utilisateurs tels que IFPen, Airbus, Naval Group ou Engie.

La Linux Foundation, quant à elle, dans la trace de ce nom devenu presque une marque, vise à regrouper des grands domaines pour lesquels existe une possibilité de logiciels libres. Se positionnant sur des thèmes comme l’industrie automobile, les réseaux de télécommunications ou encore l’énergie, certaines de ses initiatives sont déjà adoptées par de grands noms de l’industrie. Il faut toutefois souligner que leur degré d’implication peut être variable. Ainsi peuvent-ils utiliser des logiciels libres au sein d’une vaste panoplie d’outils incluant des logiciels propriétaires.

Quel modèle économique pour le logiciel libre ?

Le logiciel libre continue d’animer les débats des spécialistes du développement informatique tout en attirant de nouveaux adeptes. Les particuliers comme les entreprises sont prêts à les utiliser. Pour ces dernières, l’utilisation est parfois timide, mais un mouvement est perceptible associant logiciel libre, qualité et contrôle des nouvelles versions. Les problèmes néanmoins existent. On voit parfois apparaître des « versions » de ces logiciels, comme pour leurs cousins traditionnels. Dans certains cas, des clubs utilisateurs se mettent en place, afin de hiérarchiser les correctifs et surtout les nouvelles fonctionnalités. Il est donc nécessaire d’introduire une notion de gestion de ces logiciels.

La société américaine Red Hat fait partie de celles qui ont saisi l’importance d’une plus grande structuration et IBM ne s’y est pas trompé. Certes, le logiciel est ouvert et gratuit. Mais l’intérêt d’assurer maintenance et formation est le filon qu’il s’agit d’exploiter. Créée il y a vingtaine d’années Red Hat visait tout d’abord à vendre des accessoires aux utilisateurs de Linux et d’Unix. Très vite elle a lancé sa propre version de Linux. Son modèle économique s’est ensuite étendu à la distribution des systèmes Linux/GNU, à la vente de services de formation, d’intégration ou de maintenance.

Pour ne pas risquer d’être qualifiés de vecteur de publicité, nous ne détaillerons pas les offres de ce puissant fournisseur, désormais adossé à un géant de l’informatique. Soulignons simplement, en conclusion, que l’open source, depuis sa naissance il y a 30 ans, a bien évolué. L’esprit communautaire et de partage existe toujours avec une myriade de logiciels utilisés dans le monde, mais sans exercer une domination flagrante. Dans la foulée de cet élan que Robert Metcalfe jugeait utopique et voué à l’échec, les majors du secteur ont senti l’avantage, mais aussi le profit, que cette voie alternative représentait. ■

Bruno Meyer

Poleymieux au Mont d'Or

Samedi 27 juin à 19h45

Dimanche 28 juin à 15h00

salle Claude Pillonel
(Place de la mairie)

Théâtre

Un spectacle

pour toute la famille.

La vie et l'œuvre d'un grand savant

André-Marie Ampère Citoyen de Poleymieux

Une pièce de Jean-Félix Hurbin

Mise en scène de Jean-Félix Hurbin, Corinne Caudan, Monique Bally

Avec les troupes théâtrales de Poleymieux et de Curis au Mont d'Or



Réservation obligatoire sur <http://amperemusee.fr>

ou https://frama.link/festival_ampere2020

ou Maison d'Ampère-Musée de l'électricité 300 route d'Ampère 69250 Poleymieux au Mont d'Or - tel 04 78 91 90 77

Renseignements : contact@amperemusee.fr





La mesure de l'apparence

La maîtrise de la perception visuelle des surfaces des produits manufacturés est un enjeu central pour l'industrie de demain. Elle implique de relever de nombreux défis scientifiques dont celui, multifactoriel, de la numérisation de l'apparence des états de surfaces.

Introduction

La mesure de l'apparence des objets vus par des individus est nécessaire pour répondre aux besoins industriels (contrôle qualité en fin de chaîne de production, réalisme de la reproduction d'un objet 3D) et sociétaux (génération de nouveaux effets visuels, recherche de la sensation de qualité, de naturel, d'esthétique). Ce besoin de mesure se complexifie avec l'arrivée de nouveaux effets comme le sparkle¹ dans l'automobile, l'iridescence² dans les cosmétiques, le mat dans l'orfèvrerie.

¹ Sparkle : scintillant.

² Iridescence : propriété de certaines surfaces qui semblent changer de couleur selon l'angle de vue ou d'illumination. On les appelle aussi goniochromatiques si le changement est lent (voir plus loin dans le texte).

La mesure de l'apparence sollicite plusieurs champs disciplinaires : métrologie, spectrophotométrie, psycho-physique, statistiques. Ce secteur est dynamique. Aujourd'hui, quelques instruments de mesure existent mais ils ne caractérisent souvent que partiellement l'apparence visuelle. D'autres sont en développement. Au plus haut niveau de la chaîne de mesure, les instituts nationaux de métrologie européens s'activent pour proposer de nouvelles références, de nouveaux matériaux étalons et de nouvelles méthodes de mesure. La métrologie française, de par son activité de recherche développée au sein du laboratoire commun de métrologie LNE-CNAM, est aux premières loges puisqu'elle coordonne depuis 2012 l'action européenne dans ce domaine et développe des instruments de pointe qui permettent de progresser dans la compré-

hension des phénomènes optiques qui sont à l'origine de l'apparence des matériaux.

Pourquoi mesurer l'apparence ? Et comment faire ? Qu'appelle-t-on l'apparence ?

L'apparence est une sensation visuelle. Les objets ayant la même forme sont différenciés par l'apparence de leur surface, subtile combinaison d'attributs tels que la couleur, le brillant, la translucidité, la texture et le scintillant (**figure 1**).

Pour l'individu qui regarde un étal ou un catalogue, l'apparence permet d'identifier le matériau et la manière dont il a été travaillé. A partir de là, il se forge une idée sur sa qualité, son esthétique, son histoire. Ce cheminement peut déclencher l'envie d'acquérir ou au contraire de rejeter l'objet.



●●● Pour cette raison, l'industriel a intérêt à prendre cette question d'apparence très au sérieux, s'il veut se démarquer de la concurrence et faire des affaires. Ainsi, depuis la naissance de l'artisanat jusqu'à nos jours, les fabricants rivalisent de soin, de créativité et d'innovation pour nous proposer des objets dont l'apparence est attractive.

L'attractivité de l'apparence

Depuis un peu plus de 20 ans, les industriels s'emploient à produire des effets visuels de plus en plus complexes et sophistiqués. C'est l'industrie automobile qui est motrice d'innovation (**figure 2**). Elle lance d'abord les peintures métallisées, qui permettent de souligner les arêtes des carrosseries. Puis rapidement viennent les peintures nacrées, goniochromatiques, scintillantes. Les peintures, brillantes depuis toujours, deviennent satinées ! Les cosmétiques, le papier, les

emballages emboîtent le pas et proposent, eux aussi des effets similaires.

La maîtrise de la perception visuelle des surfaces des produits manufacturés est donc un enjeu central pour l'industrie de demain et de nombreux défis scientifiques associés sont à relever, dont celui, multifactoriel, de la numérisation de l'apparence des états de surface.

Métrologie de l'apparence

Le métrologue se doit, de son côté, de fournir des méthodes ou des protocoles de mesure pour d'une part soutenir les industriels dans leur démarche d'innovation, et d'autre part leur permettre de contrôler la qualité et la stabilité de leur production.

Historique

Jusqu'au début du 20^e siècle, le contrôle de la qualité de l'apparence des surfaces produites était exclusivement réalisé par des

experts qui évaluaient visuellement la production par rapport à des échantillons de référence. Le capteur visuel est un excellent capteur différentiel, capable de détecter des écarts de couleur infimes. Mais malheureusement, c'est un piètre capteur absolu. De plus, ce capteur fatigue après quelques heures, il peut être instable sans raison apparente et susceptible de partir à la retraite un jour, mettant en danger la traçabilité de la mesure !

Ainsi, à partir du 20^e siècle, la métrologie s'est attaquée à ce problème, et a développé la métrologie de l'apparence. Il s'agit de contrôler la production industrielle qui fabrique par exemple des voitures monochromatiques présentant un niveau de brillant très élevé.

Science de la couleur

Afin de s'affranchir de la subjectivité, qui pourrait être propre à chaque individu, la Commission internationale de l'éclairage

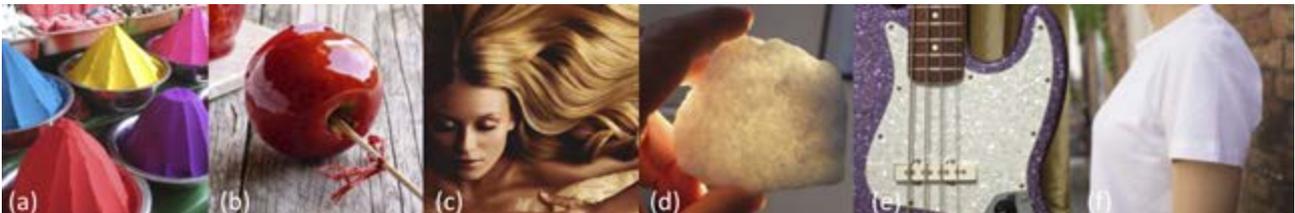


Figure 1 : L'apparence d'un objet provient des attributs visuels que sont la couleur (a), le brillant (b), la texture (c), la translucidité (d), le scintillant (e) ou la fluorescence (f).



Figure 2 : L'industrie automobile est motrice d'innovation dans le domaine de l'apparence. Les peintures, initialement uniformes et brillantes (a), deviennent métalliques dans les années 80 (b). Elles sont aujourd'hui goniochromatiques (c), scintillantes (d) ou satinées (e). Les caractériser nécessite d'aller au-delà de la couleur.



Figure 3 : La maîtrise de la couleur permet l'identification visuelle. L'utilisateur associe une couleur à une marque.

(CIE) a normalisé en 1931 un observateur étalon, individu théorique dont la vision colorée est représentative de la « moyenne » de la population humaine [1]. Avec lui, la science de la mesure de la couleur, la colorimétrie, est née. Des instruments qui miment la perception de cet observateur étalon ont été développés. On les appelle des « colorimètres ». L'industrie peut alors, avec succès, contrôler, stabiliser et formuler la couleur. Certaines marques vont même s'approprier certaines de ces couleurs, au point d'en faire une véritable signature (**figure 3**).

Au-delà de la couleur

Mais l'inventivité des ingénieurs n'a pas de limites. Ainsi, on s'aperçoit que l'ajout de particules de mica à très haut pouvoir réfléchissant dans le liant génère, sous l'éclairage directif du Soleil, de petits points lumineux qui scintillent à la surface de l'objet, comme les étoiles dans le ciel. La peinture devient presque vivante. Fascination visuelle et romantisme, le public adore, l'effet sparkle est né. Il recouvre aujourd'hui plus de 80 % des véhicules neufs produits dans le monde. Ajoutons des stries sur ces paillettes et elles diffractent alors la lumière. Les étoiles deviennent colorées individuellement ! Sublime. D'autres proposent de jouer sur la transparence de dépôts multicouches, s'inspirant de certains papillons ou coléoptères. Alors, la couleur change avec la direction d'illumination et d'observation. Si le changement est rapide et décrit tout le spectre visible, on parle d'iridescence, si le changement est lent et se limite à quelques couleurs, on parle de goniochromatisme. Dans tous les cas, ces effets permettent de souligner les arêtes des objets et de sublimer les formes (**figure 4**).

Dans les années 2000, les ordinateurs portables se démocratisent. On connaît leur complexité, qui sous-tend le sentiment de fragilité. Et pourtant, on les emmène partout ! L'utilisateur est rassuré si la coque extérieure de son portable semble solide, comme les machines d'antan. La finition aluminium ou acier brossé apparaît. L'effet est anisotropique, métallique et véhicule le sentiment de robustesse. Son succès est tel qu'il va rapidement envahir le marché de l'électro-ménager.

Dans les années 2010, c'est peut-être la prise de conscience de l'empreinte de l'Homme sur l'environnement qui le pousse à retourner vers des surfaces qui apparaissent plus naturelles, plus biologiques. Le brillant, symbole de luxe au XXe siècle devient « bling bling ». On lui préfère le satin de la patine des vieux meubles en bois, ou le mat du liège, de la pierre. Les finitions mates ou satinées apparaissent, allant jusqu'à recouvrir les voitures.

La « BRDF »

Tous ces nouveaux effets sont directionnels. Pour les caractériser, une seule mesure ne suffit plus. Pour saisir leur subtilité, il faut illuminer la surface selon plusieurs directions et pour chacune de ces directions, mesurer la lumière qu'ils réfléchissent, selon plusieurs directions.

La grandeur radiométrique adaptée est la « fonction de distribution bi-directionnelle du coefficient de luminance », plus connue sous son acronyme anglophone « BRDF » pour Bidirectional Reflectance Distribution Function (**figure 5**). La CIE définit cette quantité comme « la fonction qui décrit les variations, en fonction de la direction d'observation et d'illumination, de la luminance réfléchie » ●●●



Biographie

Gaël Obein est maître de conférences HDR au Conservatoire national des arts et métiers. Il entre au CNAM en 2006 où il met en place et développe la métrologie de l'apparence au sein du Laboratoire commun de métrologie LNE-CNAM. Depuis 2012, il anime la métrologie européenne sur cette thématique par le biais des projets européens qu'il coordonne (xDReflect, BiRD, BxDiff). Depuis 2007, Gaël Obein est en charge de la réalisation et du maintien des références nationales de photométrie et spectrophotométrie. Il est membre du CCPR et d'EURAMET-TC-PR. Il dirige deux comités techniques à la CIE, l'un sur la mesure de la BRDF, l'autre sur la mesure du brillant. En 2017, il prend la présidence de CIE-France, le comité miroir national de la Commission internationale de l'éclairage. En janvier 2020, il est élu président de l'Association française de l'éclairage. En décembre 2019, il a reçu le prix de la recherche du LNE (Laboratoire national d'essais)



Figure 4 : Sparkle (a), iridescence (b), métal brossé (c), matité (d). Nos ingénieurs ne manquent pas d'idées pour créer de nouveaux effets visuels

●●● par un élément de surface à une longueur d'onde donnée, par rapport à l'éclairement de cette surface pour une direction définie» [2]. C'est une grandeur radiométrique. Elle a six degrés de liberté et s'exprime en inverse stéradian [sr⁻¹].

La BRDF caractérise intégralement la réflexion lumineuse à la surface d'un matériau. En cela, elle contient l'information exploitée par l'observateur pour analyser l'apparence. La couleur provient de la lumière qui a pénétré au travers de la surface, a interagi avec les pigments ou les couches multiples et a été réémise dans l'hémisphère dans une direction aléatoire. Pour l'acquérir, il faut bien maîtriser la longueur d'onde, mais il n'est pas important de faire beaucoup de mesures angulaires. Après tout, une surface uniforme a la même couleur dans toutes les directions et une surface goniochromatique, qu'elle soit de type interférométrique ou diffractive, présente des variations angulaires molles, se manifestant à l'ordre du degré voire de la dizaine de degrés [3][4].

Pour le brillant, c'est un peu l'inverse. Il provient de la lumière réfléchi par la surface. Il est localisé autour de la direction miroir, dans ce que l'on appelle le « pic spéculaire ». Plus le pic est pointu, plus le matériau est brillant. Pour mesurer le brillant, il faut donc mesurer la BRDF avec une très fine résolution angulaire, pour pouvoir analyser ce pic pointu [5] [6]. Mais à quoi bon couvrir tout l'hémisphère ? Et pourquoi acquérir l'information spectrale ? On sait que le brillant est confiné dans le spéculaire et qu'il n'est pas spectral.

L'effet sparkle, nous l'avons vu, consiste en de minuscules points lumineux, qui brillent comme des étoiles. Dans la BRDF, on verra apparaître des pics de luminance, très fins, et dans différentes directions. La quantification de l'effet sparkle est encore à l'étude aujourd'hui [7][8]. Elle dépend de la densité de pics, mais également de l'intensité de ces pics. L'ajout récent de couleur dans cet effet complexifie encore d'avantage la tâche.

La texture provient de la variation de la BRDF en fonction du déplacement de la surface de mesure A (figure 5). On parle alors d'acquérir la SVBRDF, la BRDF spatialement variable, qui est une grandeur à huit degrés de liberté ! Dans ce cas l'emploi d'un système imageur (un appareil photo) devient indispensable. Cet appareil doit être calibré, ce qui nécessite un travail minutieux [9].

La translucidité se situe elle, dans l'autre hémisphère. Pour la caractériser, on ne fait pas des mesures de « réflectance », mais des mesures de « transmittance ». On parle alors de la mesure de la BTDF (Bidirectional Transmittance Distribution Fonction). Cette grandeur est similaire à la BRDF, mais en transmission. Elle est encore très mal connue mais un projet métrologique l'étudie actuellement [10].

Pour acquérir l'information sur la fluorescence, il faut illuminer l'échantillon à une longueur d'onde donnée et mesurer la BRDF pour une autre longueur d'onde. Et il faut recommencer, en combinant toutes les longueurs d'onde du visible, mais aussi de l'UV pour ce qui est du faisceau incident. Et il faut faire cela pour différentes directions

d'illumination et d'observation, car les chercheurs se sont récemment rendu compte que la fluorescence n'est pas complètement lambertienne³. On parle de mesure du facteur de réflexion bi-spectral et bidirectionnel. Cela peut sembler insurmontable, mais des métrologues ont réalisé ce type de mesure ces dernières années [11][12].

Nouvelle génération d'instruments

Dans ce nouveau contexte, les fabricants de spectrophotomètres développent actuellement une nouvelle génération d'instruments, capables d'acquérir la lumière réfléchi par les objets dans plusieurs configurations angulaires (on parle alors de spectrophotomètres multi-angles) ou capables de faire tourner l'éclairage et le détecteur autour de l'échantillon à l'aide de bras rotatifs (on parle alors de goniospectrophotomètres). Certains combinent avantageusement l'usage de capteurs imageurs qui vont réaliser en quelques millisecondes des millions de mesures, avec des éclairages à LED très collimatés qui permettent de bien maîtriser la ou les directions d'illumination.

Ces instruments fonctionnent en général en relatif. Ils comparent, dans une configuration angulaire donnée, le signal émis par la surface à mesurer à celui d'une surface étalon.

³ Une source lumineuse lambertienne, est une source de lumière dont la luminance est uniforme angulairement, c'est-à-dire identique dans toutes les directions.

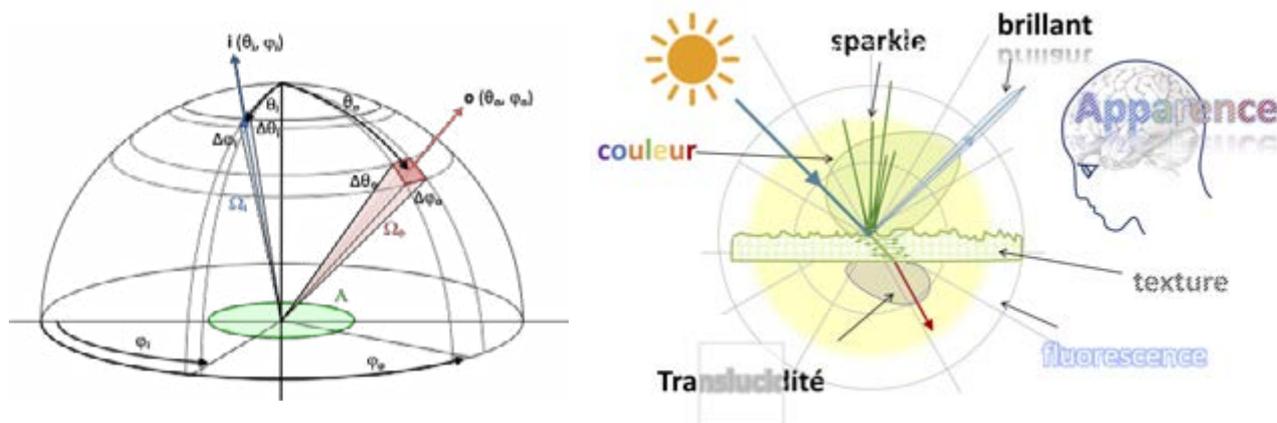


Figure 5 : La BRDF est le rapport de la luminance réfléchi par la surface A dans une direction $o(\theta_o, \phi_o)$, par l'éclairement de cette même surface provenant d'une direction $i(\theta_i, \phi_i)$ (gauche). Le système visuel exploite l'information présente à différents endroits de la BRDF pour extraire les attributs visuels de l'apparence (droite).



Figure 6 : Argon3 à la PTB (GE)(a), MARS au METAS (CH)(b), ConDOR au LNE—CNAM (FR)(c), GEFE au CSIC (ES)(d) ou ROSI au NIST (US)(e). Derrière chacun de ces noms se cache un goniospectrophotomètre primaire qui matérialise la référence nationale de BRDF. Ces équipements ont tous moins de 20 ans car le besoin de références dans ce domaine est récent.

Afin de répondre à la demande croissante d'étalonnages de ces nouveaux spectrophotomètres, et pour s'assurer que la traçabilité aux références nationales est robuste, les instituts nationaux de métrologie développent de leur côté des goniospectrophotomètres dits « primaires », qui permettent de matérialiser cette nouvelle quantité qu'est la BRDF de façon absolue [13][14][15][16][17] (figure 6).

Le défi pour ces équipements est de mesurer le facteur de réflexion de la surface pour n'importe quelle direction d'illumination et d'observation avec une très grande exactitude. Cette mesure doit être traçable aux références nationales.

Depuis 2012, de gros efforts ont été consentis par les laboratoires nationaux de métrologie pour développer une métrologie performante dans ce domaine. En Europe, ces efforts ont même été coordonnés afin de favoriser la complémentarité des équipements construits et d'éviter les redondances, grâce aux projets de recherche européens xDReflect (2012–2015), BiRD (2017-2020) et BxDiff (2019-2022), financés par le programme EMPIR et coordonnés par le LNE-CNAM.

En 2016, dans le cadre du projet Européen xDReflect [18], huit instituts nationaux de métrologie ont comparé la qualité de leurs échelles, pour des mesures de BRDF réalisées dans le plan d'incidence. Les échelles se recoupent environ à 2% [19] sur le domaine du visible. Cette comparaison a permis de pointer la sensibilité des équipements à la polarisation, elle doit être évaluée pour réduire les incertitudes dans le futur [20].

Aujourd'hui, les progrès sont tels que l'on est presque capable de mesurer la lumière réfléchie par les surfaces et entrant dans la pupille de l'observateur avec la même

acuité angulaire et spectrale que celle de l'œil humain.

Quantification de l'apparence

Sommes-nous réellement capables de mesurer l'apparence des matériaux ?

Malheureusement, la réponse est non. Car l'apparence n'est pas une quantité radiométrique. C'est une quantité visuelle, qui est localisée dans la tête de l'observateur, quelque part entre la rétine de l'œil et les profondeurs de notre cerveau. La mesure de l'apparence requiert une étape additionnelle qui consiste à mesurer la sensation visuelle, celle-là même qui est dans la tête.

Mesurer une sensation

Il n'est pas question d'aller placer un instrument de mesure à cet endroit. On accède à la sensation en utilisant les techniques de la psychophysique [22]. Ces expériences s'appuient sur l'utilisation d'échantillons et d'observateurs qui réalisent des évaluations visuelles de ces échantillons selon un protocole défini, dans des cabines dont l'environnement lumineux est rigoureusement contrôlé. À l'aide d'outils statistiques, et en ajoutant une bonne dose de rigueur et de persévérance, il est possible de classer les échantillons utilisés selon des « échelles de sensation visuelle », caractérisées par des valeurs numériques auxquelles sont associées des incertitudes, exactement comme une balance le fait pour un ensemble d'objets de différentes masses.

Modèles d'apparence

La dernière étape consiste à lier les échelles visuelles avec les mesures optiques. Elle repose sur la modélisation. Il faut modéliser les mesures de BRDF qui peuvent parfois être constituées de millions de données, afin de

les résumer à quelques valeurs numériques pertinentes, qui sont la « signature » de la surface étudiée. Ces modèles exploitent les connaissances actuelles sur l'interaction lumière/matière. Ils requièrent souvent des mesures complémentaires en entrée, comme la rugosité, l'indice de réfraction du matériau. Il faut également modéliser les points des échelles visuelles, en s'appuyant cette fois sur nos connaissances des processus de traitement de l'information par notre cerveau, ou parfois simplement en utilisant des équations mathématiques empiriques. Il faut enfin connecter les modèles optiques et visuels entre eux afin de construire une nouvelle métrique, voire même une nouvelle grandeur, qui permet de quantifier, par une valeur chiffrée, issue d'une mesure optique, la sensation visuelle, logée dans la tête de l'observateur humain.

Conclusion

Ce cheminement est bien connu. C'est en procédant de la sorte que les unités de la photométrie (la candela, le lux, le lumen) sont nées au début du siècle dernier [23]. C'est en utilisant les mêmes techniques que la colorimétrie, puis plus tard les modèles d'apparence colorée, que la gestion et la formulation de la couleur ont vu le jour [24]. C'est toujours ce chemin que suivent les métrologues aujourd'hui, avec l'objectif de fournir demain à l'industrie des méthodes qui permettent de quantifier l'« apparence totale », c'est-à-dire la couleur, mais également le brillant, la texture, la translucidité, le scintillant ou la matité, tout en garantissant la stabilité, la comparabilité et la traçabilité des grandeurs mesurées. ■

Gaël Obein

Maître de conférences

Conservatoire national des arts et métiers

Résumé

La mesure de l'apparence des objets est nécessaire pour répondre aux besoins industriels et sociétaux. Elle sollicite plusieurs champs disciplinaires : métrologie, spectrophotométrie, psychophysique, statistiques. La métrologie française développe des instruments de pointe qui permettent de progresser dans la compréhension des phénomènes optiques à l'origine de l'apparence des matériaux.

Aujourd'hui, les progrès sont tels que l'on est presque capable de mesurer la lumière réfléchiée par les surfaces et entrant dans la pupille de l'observateur avec la même acuité angulaire et spectrale que celle de l'œil humain. La modélisation qui connecte les modèles optiques et les modèles visuels permet de construire une nouvelle métrique pour quantifier la sensation visuelle de l'observateur humain. ■

Abstract

Measuring the appearance of objects is necessary to meet industrial and societal needs. It calls upon several disciplinary fields: metrology, spectrophotometry, psychophysics, statistics. French metrology is developing state-of-the-art instruments which allow progress in the assessment of the optical phenomena at the origin of the appearance of materials.

Today, progress is such that we are almost able to measure the light reflected by surfaces and entering the pupil of the observer with the same angular and spectral acuity as that of the human eye. The modeling that connects the optical models and the visual models enables to build a new metric in order to quantify the visual sensation of the human observer. ■

Bibliographie

- [1] International Organization for Standardization, "Colorimetry", ISO 11664
- [2] Commission Internationale de l'Éclairage, International Lighting Vocabulary, CIE S 017/E:2011 (Vienna: Central Bureau of the CIE, 2011)
- [3] C. Strothkämper, K.-O. Hauer, Andreas Höpe, "How to Efficiently Characterize Special Effect Coatings", *J. Opt. Soc. Am. A*, 33(1), p 1-8, 2016
- [4] A. Ferrero et al, "Color characterization of coatings with diffraction pigments", *J. Opt. Soc. Am. A*, 33(5), p. 1978-1988, 2016
- [5] A. Rabal, G. Ged, G. Obein, "What is the true width and height of the specular peak according to the level of gloss ?", Proceedings of the 29th Quadriennial Session of CIE, CIE x046:2019, 2019, OP88
- [6] Obein G., Audenaert J., Ged G., Leloup F., "Metrological issues related to BRDF measurements around the specular direction in the particular case of glossy surfaces", *Proc. SPIE* 9398, 2015.
- [7] A. Ferrero, S. Bayón, "The measurement of Sparkle", *Metrologia*, 52, 317-323, 2015
- [8] Gómez, O., Perales, E.; Chorro, E.; Viqueira, V.; Martínez-Verdú, F.M. , "Visual and instrumental correlation of sparkle by the magnitude estimation method", *App. Opt.* 55(23), 6458-6463, 2016
- [9] CIE 233:2019, "Calibration, Characterization and Use of Array Spectroradiometers", ISBN: 978-3-902842-75-6, DOI: 10.25039/TR.233.2019
- [10] "BxDiff, New quantities for the measurement of appearance", projet financé par Euramet et l'UO dans le cadre du programme EMPIR, <https://bxdiff.cmi.cz/>
- [11] Jaanson P, Pulli T, Manoocheri F and Ikonen E, « A reference material with close to Lambertian reflectance and fluorescence emission profiles », *Metrologia* 53(6), 2016
- [12] A. Ferrero, B. Bernad, J.L. Velázquez, A. Pons, M.L. Hernanz, P. Jaanson, F.M. Verdú, E. Chorro, E. Perales, J. Campos, « Measurement of goniofluorescence in photoluminescent materials », Proceedings of 28th session of CIE, 2015
- [13] Hünerhoff D., Grusemann U. and Höpe A., «New robot-based gonioreflectometer for measuring spectral diffuse reflection», *Metrologia* 43, S11-S16 (2006)
- [14] Baribeau, R., Neil, W.S. and Côté, E., "Development of a robot-based gonioreflectometer for spectral BRDF measurement," *J. Mod. Opt.* 56, 1497-1503 (2009).
- [15] Rabal A. M., Ferrero A., Campos J., Fontecha J. L., Pons A., Rubiño A. M. and Corróns A., "Automatic gonio-spectrophotometer for the absolute measurement of the spectral BRDF at in- and out-of-plane and retroreflection geometries", *Metrologia* 49, 213-223 (2012)
- [16] Obein G., Bousquet R, Nadal M., "New NIST Reference Goniospectrometer", *SPIE* 5880, T1-T10, (2005).
- [17] Quarets S., Ged G., Razet A. and Obein G., «A new gonioreflectometer for the measurement of the bidirectional reflectance distribution function (brdf) at LNE-CNAM», CIE x037:2012, 687-691 (2012),
- [18] "xDReflect, Multidimensionnal Reflectometry for Industry", projet financé par Euramet et l'UO dans le cadre du programme EMPR, <https://www.xdreflect.eu/>
- [19] Strothkämper C., Ferrero A., Koo A., Jansson P., Ged G., Obein G., Källberg S., Audenaert J., Leloup F., Verdu F., Perales E., Schirmacher A., Campos J., 2016, "Multilateral Spectral Radiance Factor Scale Comparison", *Applied Optics*, 56(7), p1996-2006,
- [20] Quast T., Schirmacher A., Hauer K-O, Koo A., "Polarization properties and microfacet-based modelling of white, grey and coloured matte diffuse reflection standards", *J. Phys.: Conf. Ser.* 972, 2018
- [21] Voir les projet xDReflect, BiRD et BxDiff, financés par Euramet et l'UO dans le cadre des programmes EMRP et EMPIR entre 2012 et 2022.
- [22] Commission Internationale de l'Éclairage, "A framework for the measurement of visual appearance", CIE 175:2006, ISBN 978 3 901906 52 7, 2006
- [23] BIPM, Principes régissant la photométrie, Sèvres, France, BIPM, 1983
- [24] Commission Internationale de l'Éclairage, "A colour appearance model for colour management systems: CIECAM02", CIE 159:2004, ISBN 978 3 901906 29 9



La saga de l'éclairage

Des origines à la lampe à incandescence

Avant l'arrivée des LED, objets d'un dossier spécial de ce numéro de la REE, l'éclairage a connu plusieurs révolutions : la lampe à huile ou à graisse animale, l'éclairage au gaz et les premiers pas de l'éclairage électrique. Retour sur une saga qui a marqué l'histoire de l'humanité...

Introduction

L'éclairage est depuis la nuit des temps une nécessité vitale pour l'Homme. Face aux cycles journaliers qui alternent le jour et la nuit, la découverte du feu a représenté un pas capital pour les hominidés des temps reculés. Avec la maîtrise du feu, c'est une source de chaleur qui est apparue mais aussi les premières manifestations de l'éclairage artificiel. Le saut temporel et conceptuel entre ces feux primitifs et les multiples sources d'éclairage dont nous disposons aujourd'hui, est saisissant. Si on veut prendre un macroscopie, il y a deux grandes périodes dans l'histoire de l'éclairage, avant et après l'électricité industrielle. C'est la première

période que nous retraçons dans cet article en nous arrêtant à l'émergence des inventions majeures des temps modernes, la lampe à incandescence et le tube fluorescent.

Comme toujours en histoire, entrer davantage dans le détail nous emmène vers un panorama complexe qui montre que l'évolution de l'éclairage a accompagné la progression des sciences mais que les techniques ont souvent précédé les connaissances scientifiques. Avec la révolution industrielle, on entre ensuite dans une période nouvelle dans laquelle les diverses techniques d'éclairage vont se concurrencer et cohabiter assez longtemps jusqu'à la domination tardive mais

quasiment sans partage de l'électricité au XX^e siècle.

Des sociétés primitives à la renaissance

La préhistoire est marquée chronologiquement par les premières inventions et par les évolutions techniques liées à la fabrication des outils. Les âges de la préhistoire sont ainsi moins marqués par des événements spécifiques que par les traces que nous ont laissées les êtres vivants de l'époque par leur fabrication d'outils ou de dispositifs de survie. L'utilisation du feu est probablement l'une des premières manifestations de l'éclairage artificiel qui a permis aux premiers



L'auteur

Marc Leconte est ancien secrétaire du club RSSR de la SEE (radars, sonars et systèmes radioélectriques), membre du comité de rédaction de la REE, membre émérite SEE et médaillé Ampère. Au sein de Dassault Electronique, il a passé une quinzaine d'années à l'étude, au développement et aux essais en vol du radar RDI du Mirage 2000. Ensuite pendant trois ans, il a participé à l'étude d'un démonstrateur laser franco-britannique CLARA. A partir de 1995, il a élargi son activité aux domaines des études concurrentielles et stratégiques dans les domaines des radars aéroportés et de la guerre électronique. Il a exercé les mêmes activités dans la division aéronautique de Thales après la fusion de Dassault Electronique et de Thomson-CSF. A partir des années 90 et en parallèle, il s'est intéressé à l'histoire des sciences et des techniques et a publié plusieurs articles s'y rapportant.

hommes de s'affranchir de la nuit. Dater cette utilisation reste encore assez spéculatif mais peut être fixé, par les foyers découverts, autour de 450 000 ans avant Jésus Christ. Par la suite, la torche a été le plus ancien système d'éclairage mais n'a guère laissé de traces dans les sites archéologiques. Son perfectionnement a conduit aux lampes qui, elles, ont été

ver une nouvelle torche de taille réduite qui puisse s'allumer vite et brûler longtemps sans fumée. C'est ce qui a mené à l'invention de la lampe à huile qui peut être considérée comme un raffinement de la torche. En effet, alors que cette dernière est détruite physiquement par le processus de combustion, la mèche de la lampe entretient

"C'est à l'époque magdalénienne (17 000 à 10 000 ans avant J.-C.) que l'on voit apparaître de manière ponctuelle les premières proto-lampes."



Figure 1 : Lampe antique – Source : Louis Figuier.

une flamme sans destruction, au prix de la seule diminution du combustible. C'était du point de vue technique une évolution importante car combustion et combustible se trouvent alors séparés. La mèche sert de lieu de combustion et tire d'un réservoir le combustible nécessaire.

retrouvées dans les sites car elles pouvaient résister à de longs séjours dans le sol. Leur invention pourrait dater de l'époque où les animaux ont été domestiqués et dont la graisse a commencé à être utilisée comme combustible.

Dans l'Antiquité, le combustible le plus utilisé était l'huile obtenue à partir de plantes ou de graisse animale. En Mésopotamie, le pétrole qui affleuraient à même le sol, était également utilisé comme combustible. C'est à l'époque magdalénienne (17 000 à 10 000 ans avant J.-C.) que l'on voit apparaître de manière ponctuelle les premières proto-lampes, objets portables dotés d'un réservoir susceptible de recevoir une mèche et un combustible. Ces lampes se perfectionnèrent dans l'Antiquité, puis au Moyen Âge, et pouvaient dans certains cas devenir des objets d'art. Ce principe d'éclairage, bien que connaissant de nombreuses évolutions, demeurera inchangé jusqu'au XVIII^e siècle.

La lampe

Après avoir domestiqué le feu, les anciens éprouvèrent l'utilité de déplacer la flamme pour pouvoir s'éclairer hors de la proximité des foyers et pour cela ils utilisèrent des torches dont les formes les plus anciennes étaient des tisons de bois. En cuisant sa nourriture, l'homme préhistorique a pu observer que la graisse sur le bois en multipliait le pouvoir éclairant. C'est ainsi que les torches en furent enduites d'une couche épaisse afin de durer plus longtemps.

La chandelle et la bougie

Dès le XII^e siècle, la chandelle de suif a été fabriquée et utilisée. Le suif, mélange de graisse de mouton et de bœuf, était fondu puis versé dans un récipient de forme particulière dans lequel on disposait la mèche, le tout se solidifiait pour former la chandelle.

Mais les sources de lumière anciennes étaient peu maniables et il fallait trou-

A partir du XIV^e siècle, la fabrication des bougies et des cierges en cire a connu une expansion rapide. Ce mouvement a continué au cours des siècles suivants avec l'évolution des habitudes domestiques et l'éclairage des rues. Les mèches à partir du XVII^e siècle étaient faites de fil de coton. La fabrication des bougies et des cierges se faisaient avec de la cire, plus chère mais d'un rendement lumineux plus élevé que la chandelle.

Par la suite, avec les travaux de Chevreul, la bougie stéarique associera le prix peu élevé de la chandelle à l'efficacité de la bougie de cire. Réalisées avec des bougies, les illuminations indispensables à la vie de la cour étaient constituées de milliers de lumières individuelles. En 1768 pour l'éclairage du parc de Versailles il ne fallait pas moins de vingt-quatre mille lumières exclusivement constituées de bougies de cire, ce qui devait coûter une fortune. Mais c'était une exception, le coût de l'éclairage en limitait à cette époque la consommation domestique ainsi que celle des corporations au travail. Les changements d'usage interviendront, comme nous le verrons plus loin, lors de la révolution industrielle.



Figure 2 : Ami Argand – Source : Louis Figuier.

Avant Lavoisier, seule la partie de la lampe où s'effectuait la combustion avait retenu l'attention. Au XVII^e siècle, il y eut de nombreuses expériences visant à améliorer les mèches mais on ne sortait pas du modèle traditionnel de combustion. En 1783, un chimiste, François Ami Argand (figure 2), présenta au public une application des découvertes de Lavoisier. Né en 1750 à Genève, Argand fit ses études avec le chimiste genevois Nicolas Théodore de Saussure qui le recommanda à Lavoisier quand Argand s'installa à Paris.

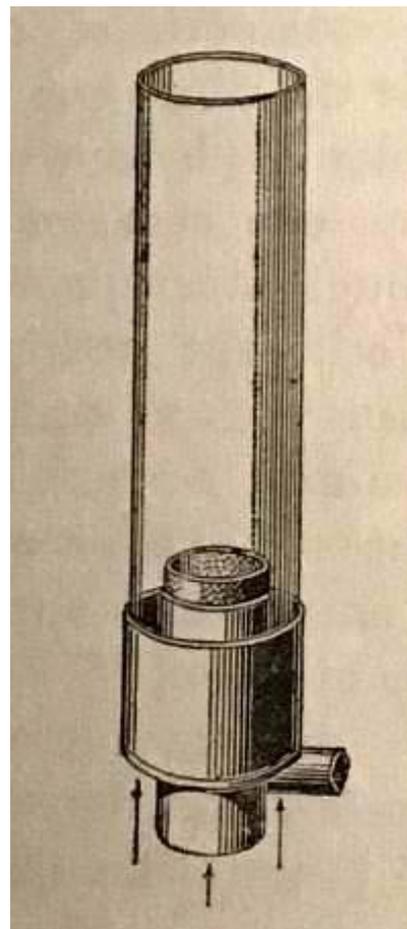


Figure 3 : Ami Argand – Source : Louis Figuier.

“Les lampes à pétrole, qui subsistaient encore au XX^e siècle, sont les héritières de la lampe Argand.”

Les inventions de l'âge moderne : la lampe à huile d'Ami Argand

Au début du XVII^e siècle, les techniques de l'éclairage, inchangées depuis des siècles, vont évoluer sous la poussée des progrès de la science, en particulier de la chimie, avec Lavoisier. Ce dernier développe une théorie de la combustion dans les années 1770 qui indique que l'oxygène contenu dans l'air est aussi nécessaire à la combustion que le carbone du combustible. Cela implique une nouvelle approche de la technique d'éclairage et de la construction des lampes dont l'alimentation en air doit être repensée et augmentée.

La lampe Argand (figure 3) était caractérisée par une mèche toute nouvelle. Elle n'était pas épaisse mais creuse et formait un petit tuyau. La flamme était doublement alimentée : en air de l'extérieur et par le combustible de l'intérieur. Cela permettait une combustion à température plus élevée et donc plus totale, ce qui évitait la formation de suie. La lumière très blanche et très vive dépassait en intensité toutes les lampes de l'époque. Une seconde innovation consistait à enfermer la lampe dans un cylindre en verre ce qui, outre l'effet de cheminée, protégeait la flamme contre les courants d'air extérieurs. Enfin, il y

avait un réglage de la mèche qui pouvait se relever et s'abaisser ce qui modulait l'intensité lumineuse. Les lampes à pétrole, qui subsistaient encore au XX^e siècle, sont les héritières de la lampe Argand.

L'éclairage industriel avant l'électricité

L'expansion de l'éclairage au gaz

Dès le XVII^e siècle, on avait découvert que, lors de la distillation du bois et du charbon, il se dégageait un gaz combustible. Ce phénomène est décrit pour la première fois par un chimiste, John Clayton dans une lettre adressée à Robert Boyle et publiée en 1739. Il constatait que le gaz dégagé par la distillation pouvait remplir un récipient étroit, puis être enflammé ensuite. Mais cette propriété ne fut pas immédiatement exploitée et c'est la révolution industrielle, vers



Figure 4 : Lampe à gaz domestique – Source : Marc Leconte.

“Le brûleur à flamme papillon s’imposa en France et, en 1829, la rue de la Paix à Paris fut la première voie publique éclairée au gaz.”

1800, qui donna le départ industriel de l’éclairage.

La lumière du gaz a été très vite utile pour éclairer les établissements industriels d’un type nouveau qui se développaient à grande vitesse à cette époque en Angleterre. La flamme du gaz n’avait pas de concurrent capable de répondre à des besoins de lumière importants. Il est intéressant de noter que cette utilisation du gaz de houille intervenait en même temps que le développement des pre-

miers chemins de fer, également en Angleterre. C’étaient des produits de la production industrielle anglaise, fondée sur l’utilisation de ses énormes ressources en charbon.

En 1800, les bases d’un futur éclairage au gaz étaient posées. Cela marquait une révolution technique considérable puisque, pour la première fois, le combustible n’était pas stocké dans un réservoir attenant à la lampe mais distribué à de multiples utilisateurs à partir d’un

réservoir central. Dans les installations industrielles, la technologie était au point ; le gaz était produit dans un alambic puis stocké dans un récipient et ensuite acheminé dans les usines vers de multiples lampes à travers un labyrinthe de tuyaux qu’on prit pour habitude d’appeler par la suite une usine à gaz.

Cette révolution technique accompagnait la révolution industrielle et économique. En investissant dans une production de gaz ainsi que dans la distribution, des entreprises pouvaient espérer en retirer d’importants bénéfices. En 1812, l’Allemand Frédéric Albert Winsor fondait la première compagnie d’exploitation du gaz d’éclairage en Angleterre et fit de même en France en 1816. D’autres sociétés virent successivement le jour à Paris mais les difficultés financières les obligèrent à fusionner ou à disparaître. En 1855, celles qui existaient encore se réunirent pour constituer la Compagnie parisienne du gaz, ce qui normalisa les installations et le matériel de distribution. Dans de nombreuses villes de France, l’exploitation de la distribution fut effectuée à partir de 1830 par des sociétés anglaises. Tout au long du XIX^e, siècle l’industrie de l’éclairage au gaz connut une rapide progression de telle sorte qu’en 1855 la production de gaz atteignait 41 millions de mètres cube et, en 1895, quelque 300 millions de mètres cube. Cette expansion était due, notamment, à la mise au point du matériel nécessaire à la distribution, dont les contraintes étaient proches de la distribution d’eau mais avec en plus les dangers d’explosion liées aux problèmes de fuites.

De nouvelles lampes : les brûleurs

La conception de l’organe essentiel de l’éclairage au gaz, le brûleur, sollicita l’imagination créatrice des ingénieurs et des inventeurs. En Angleterre, ce furent d’abord des brûleurs dit en queue de poisson, formés d’une pipe percée de plusieurs trous à son extrémité. Le brûleur à flamme papillon s’imposa en France et, en 1829, la rue de la Paix à Paris fut la première voie publique éclairée

rée au gaz. Avec le développement de l'éclairage au gaz, de multiples recherches furent menées pour trouver des formes décoratives. Mais les considérations économiques poussaient à obtenir une combustion aussi complète que possible du gaz en améliorant la distribution d'air. Pour les usages domestiques le bec papillon fut le plus employé. Diverses solutions furent étudiées pour augmenter le pouvoir éclairant et le bec le plus répandu en France fut celui mis au point en 1885 par le physicien autrichien Carl Auer von Welsbach diffusé sous le nom de bec Auer en France (**figure 5**). Il était muni d'un manchon constitué d'une toile imprégné de thorium additionné d'une petite quantité d'oxyde de césium.

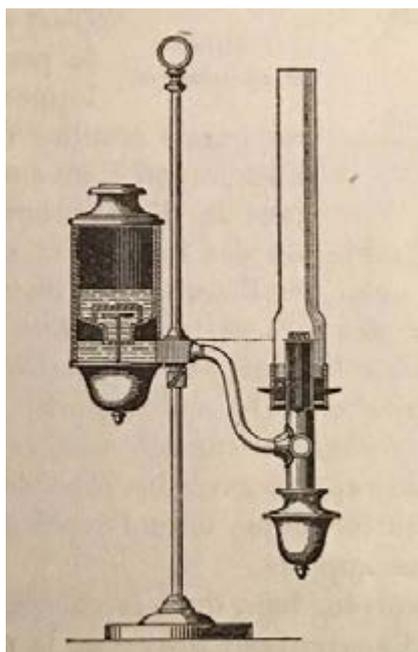


Figure 5 : Lampe à gaz domestique – Source : Marc Leconte.

Mais alors que le gaz était vendu au début de manière forfaitaire, les exploitants sentirent la nécessité de quantifier la consommation de chaque utilisateur et d'installer à cette fin des compteurs.

La domination

La vitesse d'implantation de l'industrie du gaz dans la civilisation du XIXe en Europe était à l'image de l'industrialisa-

tion de chacun des pays. L'Angleterre commença en premier et évolua rapidement loin devant les pays continentaux. Londres devint la première ville dont tous les quartiers étaient approvisionnés en gaz. En 1816, le gaz était un phénomène commun à Londres. En 1820 la plupart des grandes villes étaient éclairées au gaz et, au milieu du siècle, l'industrie du gaz avait atteint les petites villes et les villages.

En France et en Allemagne, pour des raisons économiques, l'évolution fut beaucoup plus lente. Ce n'est qu'au milieu des années 40 que l'éclairage au gaz fut bien établi à Paris et que la situation en Allemagne atteint un stade identique. En 1862, plus de 40 % du charbon utilisé dans la production du gaz était importé d'Angleterre où la seule ville de Londres à cette époque consommait deux fois plus que l'Allemagne toute entière.

Et puis vint la fin de l'éclairage au gaz...

La lumière à gaz fut considérée comme un moyen presque parfait jusqu'à ce que quelques inconvénients majeurs fassent obstacle à son utilisation universelle et à grande échelle. L'un des plus évidents était son énorme consommation d'oxygène qui entraînait une accumulation d'air usé et chauffé, surtout dans des grands volumes très éclairés comme les théâtres et les lieux publics. Dans les habitations, la chaleur pouvait s'accumuler dans les parties supérieures des pièces. La détérioration de l'air pouvait provoquer des maux de tête et était néfaste au mobilier car la combustion du gaz dégageait de l'acide carbonique, de l'eau mais aussi de petites quantités de soufre et d'ammoniac. Tous ces inconvénients firent que l'éclairage au gaz, incarnation au début du XIXe siècle, de propreté et de pureté, fut considéré à la fin du même siècle comme sale et malsain. L'éclairage allait alors vers la fin du siècle vivre une mutation majeure avec la nouvelle source d'énergie déjà vantée par Jules Verne dans 20 000 lieues sous les mers, l'électricité.

La révolution de l'électricité

Les connaissances scientifiques et l'éclairage

Les procédés d'éclairage ont connu des progrès considérables grâce à l'application de principes scientifiques. Les plus grands chimistes du XIXe siècle, depuis Gay-Lussac et Chevreul jusqu'à Pelouse et Dumas, ont contribué à l'essor de l'industrie de la bougie stéarique. Les progrès de la lampe à huile, avec les inventions d'Ami Argand, d'Antoine Quinquet dans les années 1770 et de l'horloger Bertrand Guillaume Carcel en 1800, doivent beaucoup à la science physique. La régularité de la lampe Carcel était telle, que lors du congrès des électriciens de 1881, les savants proposèrent d'utiliser comme étalon de la lumière, une lampe de ce type brûlant 42 grammes d'huile à l'heure. Avec Lavoisier et son étude de la combustion, c'est la chimie qui donna un socle théorique à la lampe Argand. Par la suite l'éclairage sera considéré par rapport à l'énergie et ses transformations. Au XIXe siècle, le problème du rendement énergétique des machines n'est pas complètement résolu. Comme nous allons le voir l'électricité est déjà bien connue fin XVIIIe siècle, mais elle ne s'imposera dans l'éclairage que lorsqu'elle sera distribuée, car au début du XIXe siècle elle n'est produite que par les dispositifs chimiques que sont les piles ce qui ne permet pas l'éclairage à grande échelle.

La vitrine de l'électricité

L'Exposition internationale d'électricité de Paris en 1881, vue par les contemporains, fut l'un des événements scientifiques les plus importants du XIXe siècle. L'électricité, déjà connue depuis longtemps, s'apprête à quitter les labos de recherche et les divertissements de salon. Elle devient une forme d'énergie que l'on commence à utiliser. Elle donne naissance à de nombreuses industries allant du télégraphe à la construction de petits moteurs ou d'appareils de chauffage.

Lors de l'exposition de 1881, la foule admire la profusion des éclairages avec, ●●●



Figure 6 : Exposition internationale d'électricité de Paris en 1881. Cette exposition fut un immense succès. Le public put admirer la dynamo de Zénobe Gramme, les lampes à incandescence de Thomas Edison, le Théâtrophone, le tramway électrique de Werner von Siemens, le téléphone d'Alexander Graham Bell, un réseau de distribution électrique par Marcel Desprez et une voiture électrique par Gustave Trouvé – Source : Wikipédia via overblog

●●● pour la première fois, une démonstration de lumière domestique à incandescence qui vient compléter les lampes à arc. Louis Figuier, grand vulgarisateur de l'époque, notera que l'éclairage des appartements fut la véritable nouveauté de l'exposition. Le débat sur la fiabilité de l'éclairage électrique se trouva ainsi ouvert et le restera pour de nombreuses années. Le gaz demeurait pour beaucoup un moyen d'éclairage très commode qui devait selon eux maintenir son usage général encore longtemps. Cependant, pour certains usages particuliers, avant les lampes à incandescence, la technologie électrique dominante restait celle des lampes à arc.

La technologie de l'arc

Le physicien et chimiste anglais Humphrey Davy, pionnier de la chimie de l'électricité, observa en 1800, pour la première fois, le phénomène lumineux produit par la décharge d'une tension électrique produite par une pile de Volta

entre deux électrodes de carbone. Pour une certaine distance entre les deux électrodes, un arc se forme qui produit une lumière très forte. La lumière à arc est, contrairement à ce que pensait Davy, une lumière à incandescence mais produit de la lumière par la combustion des électrodes chauffées à blanc par la décharge électrique.

Il fallut attendre près de 30 ans pour que la première tentative d'éclairage à arc soit tentée. Ce fut le modèle mis au point par Léon Foucault en 1844, mettant en œuvre des électrodes dures, qui résolvait en partie le problème de l'arc voltaïque qui devait maintenir constante la distance entre électrodes. L'arc produisait une lumière blanche très intense et même éblouissante qui limitait son usage aux grands espaces ou aux usages nécessitant une lumière très brillante. Foucault, pour cela, mit au point un dispositif d'horlogerie. Ce procédé entraîna le développement de multiples solutions pour les

électrodes qui étaient des mélanges de charbon et de magnésie ou encore de coke et de sucres pulvérulents. Le but était d'accroître le temps de combustion du charbon. D'autres voies furent développées en particulier par des régulateurs, non plus mécaniques mais électriques par un solénoïde ou par dérivation avec un électro-aimant en parallèle à l'arc voltaïque.

En 1876, un ingénieur des télégraphes russes, Paul Nicolaïevitch Jablochhoff, apporta une innovation technique majeure en rendant inutile le régulateur en disposant les électrodes côte à côte de telle manière que leur distance ne dépende pas de leur combustion. Ce dispositif est resté connu sous l'appellation de bougie électrique Jablochhoff. Pour assurer la combustion simultanée des deux charbons, Jablochhoff eut l'idée d'alimenter sa bougie avec du courant alternatif.

Malgré son efficacité, la lampe à arc ne fut utilisée que pour des applications très spécifiques telles que des effets spéciaux théâtraux ou l'éclairage des monuments. Par ailleurs la pile Volta qu'utilisait Davy, n'était plus adaptée et fut remplacée dans les années 60 par les dynamos de Gramme et Siemens capables de produire de grandes quantités de courant. C'est pour alimenter les lampes à arc que les grandes machines magnéto-élec-



Figure 7 : Le chimiste Humphrey Davy – Source : Louis Figuier.

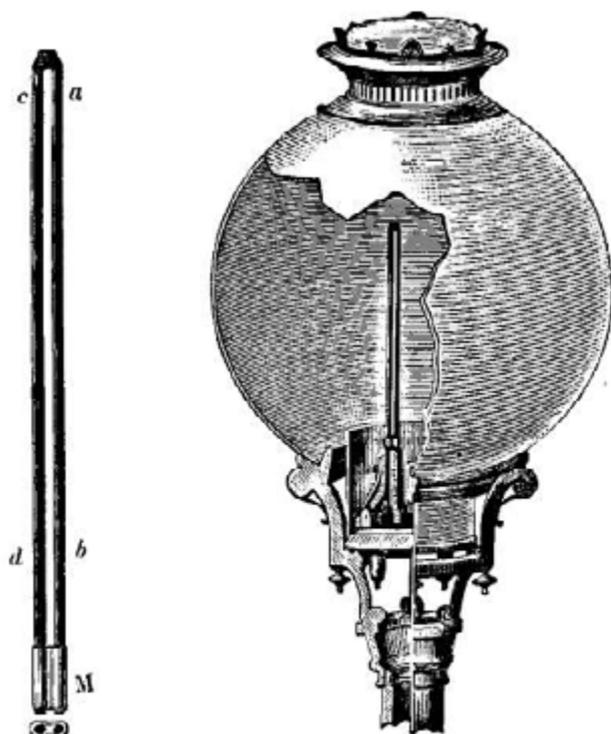


Figure 8 : La bougie Jablochhoff – Source : Louis Figuier.

triques furent développées. Cependant, malgré la concurrence des lampes à incandescence, l'arc électrique continua d'être utilisé et devint même exclusif pour les phares maritimes et, au début du cinéma, pour les appareils de projection.

La lampe à incandescence

Comme pour la lampe à arc, c'est le chimiste Davy qui réalisa le premier

traversé par un courant pour le rendre luminescent fut expérimentée par l'Anglais Frédéric de Maleyne. Le conducteur utilisé était le platine. Pour éviter que le fil se consume, il eut l'idée de placer un filament de carbone dans une enceinte dans laquelle le vide était fait. Deux obstacles devaient être surmontés : la réalisation du filament de carbone et le moyen de faire le vide. Les pompes

“Edison réunit dans un laboratoire une équipe de plus en plus nombreuse pour perfectionner et trouver des solutions techniques à la lampe à incandescence. La période de gestation dura quatre ans de 1878 à 1882.”

une expérience sur la lumière incandescente. Il observa qu'un fil métallique, traversé par un courant électrique, s'échauffait et finissait par rougir. Mais c'est seulement en 1841 que l'idée de tirer parti de l'effet Joule sur un filament

mécaniques ne permettaient pas de réaliser un vide permettant d'éviter la combustion du charbon. C'est à ce stade de l'évolution de la technique des lampes à incandescence qu'intervint l'Américain Thomas Alva Edison.

Thomas Edison

Edison se présentait lui-même comme un inventeur. Et, effectivement, il déposa près de 2 000 brevets dans des domaines très divers qui vont du microphone au télégraphe et, pour notre propos, dans le domaine de l'éclairage. Sa personnalité est l'exemple assez typique de l'inventeur homme d'affaires américain caractérisé par un très grand pragmatisme. Il était à l'écoute de toutes les idées nouvelles exprimées ou expérimentées avec succès dans tous les pays et il distinguait assez rapidement le parti qu'il pouvait en tirer sans s'embarasser de la méthode rigoureuse de la démarche scientifique.



Figure 9 : Thomas Alva Edison – Source : Louis Figuier.

S'agissant de l'éclairage, Edison connaissait, dès 1877, la bougie Jablochhoff qui avait été installée avenue de l'Opéra à l'occasion de la troisième exposition universelle française, celle de 1878, qui avait fait l'objet de nombreux commentaires favorables aux États-Unis. Ce qui avait frappé les esprits était non seulement le type d'éclairage mais également le système de production et distribution d'électricité. C'est probablement en visitant une installation électrique constituée de lampes à arc dans une fonderie de cuivre qu'Edison eut l'intuition que l'électricité devait s'utiliser comme le gaz, avec une distribution au départ d'une centrale, distribuée par des circuits de dérivation pour, en fin de réseau, venir alimenter l'éclairage des

... pièces d'habitation par des lampes d'intensité plus faible que les lampes à arc. Il fallait donc lever le verrou technologique des lampes à incandescence. Edison réunit dans un laboratoire une équipe de plus en plus nombreuse pour perfectionner et trouver des solutions techniques à la lampe à incandescence. La période de gestation dura quatre ans de 1878 à 1882.

Bien qu'Edison envisageât l'éclairage comme un système complet allant de la production à la distribution, il commença ses travaux par l'étude et la réalisation d'une lampe à filament. A la même époque, un chimiste anglais, Joseph Swan, qui avait travaillé quelques années auparavant sur la lampe à filament mais l'avait abandonnée en 1860, reprenait ses expériences.

La lampe à filament de Swan

L'élément nouveau des années 1880, par rapport aux années 60, étaient les nouveaux moyens de faire le vide. En 1865, l'Allemand Herman Sprengler avait mis au point un dispositif qui améliorait le vide dans des enceintes à basse pression, en

entraînant l'air résiduel par l'écoulement d'un chapelet de gouttelettes de mercure dans un tube de verre de petit diamètre. Cette méthode permettait d'obtenir des vides de l'ordre de quelques millimètres de hauteur de mercure. Le tube de Crookes en 1876 avait bénéficié de cette nouvelle technique.

rée de vie pouvait atteindre 400 heures, ce qui permettait une utilisation domestique. Swan pris un brevet en 1880, présenta sa lampe au grand public et réussit à trouver des appuis financiers solides qui lui permirent de fonder une société la Swan United Electric Co. A l'occasion de l'Exposition internationale d'électricité

“Mais pour Edison la lampe n'était que l'un des maillons d'un système électrique d'éclairage. Il étudia ainsi à partir de 1879, la constitution d'une dynamo capable de fournir une alimentation à tension fixe pour une lumière d'une intensité constante.”

Joseph Swan qui était chimiste choisit le coton pour comme matériau qu'il enroula en boucle dans des creusets et carbonisa ensuite. Swan imagina de porter ce filament à incandescence pendant qu'il réalisait le vide. Par la suite, il perfectionna encore son filament par des traitements préliminaires effectués avant la carbonisation et obtint des filaments dont la du-

de 1881, il exposa un lustre à l'opéra de Paris et un autre dans la salle du congrès d'électricité. Pour la distribution, il reprit l'idée de l'alimentation en parallèle expérimentée en 1875, rompant avec la pratique expérimentée jusque-là du montage en série.

La lampe à filament d'Edison

Edison, sans connaître les travaux de Swan, chercha tout d'abord à réaliser des filaments par la carbonisation de papier, tout en laissant publiquement entrevoir ses ambitions dans ce domaine. A l'instigation de la Western Union qui voulait s'assurer l'exploitation exclusive des futurs procédés d'Edison, un groupe des principaux financiers de New-York fonda une société appelé Edison Electric Light Company qui s'engageait non pas sur des réalisations mais sur des projets, ce qui indique la confiance des milieux d'affaires de l'époque dans les travaux d'Edison.

Les premiers essais de filament en papier carbonisé furent des échecs en raison de leur structure. Edison essaya alors des métaux comme le platine ou encore le thorium. Il avait comme Swan connaissance du système de fabrication du vide de Sprengler avec une fermeture de l'ampoule au chalumeau. Mais les résultats n'étaient pas satisfaisants et Edison revint

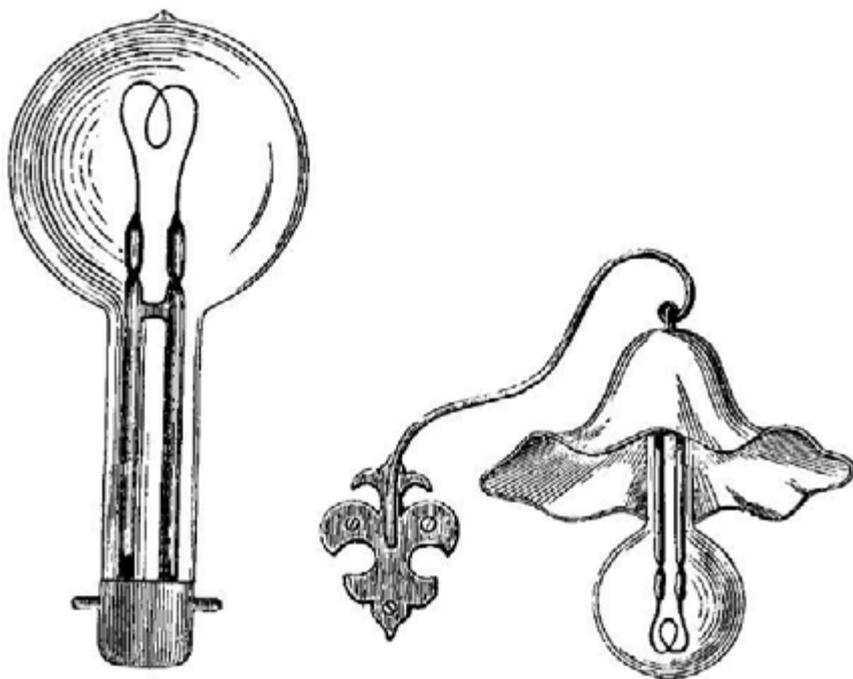


Figure 10 : Lampe Swan – Source : Louis Figuier.

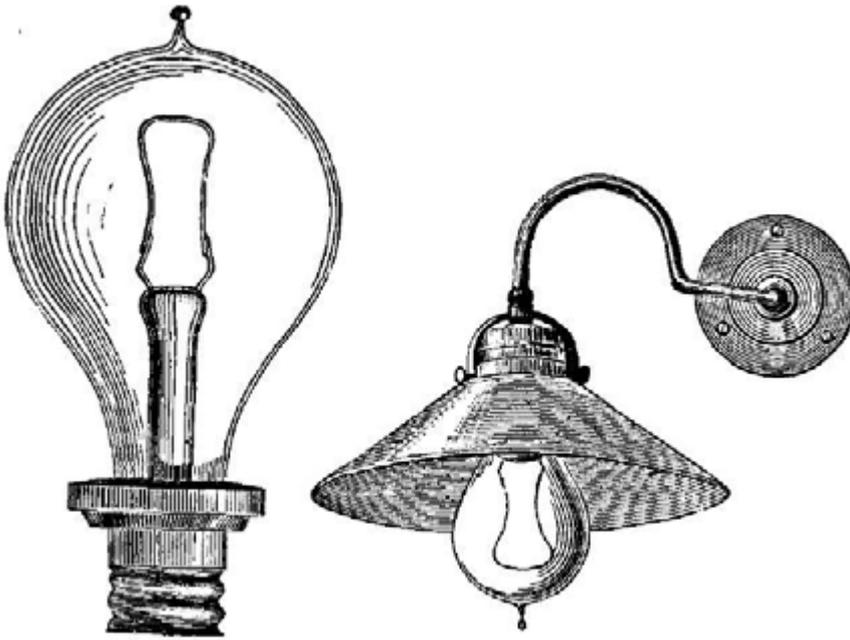


Figure 10 : Lampe Edison – Source Louis Figuier.

au carbone et pensa qu'une fibre végétale pourrait donner de bons résultats. Il en vint à choisir le bambou. La canne de bambou était réduite par des décompositions répétées en fibres fines puis carbonisées et pliées en forme de filament. C'est au Japon qu'Edison trouva la meilleure fibre de bambou laquelle était longue et régulière. Après une année d'essais, Edison et ses collaborateurs développèrent la lampe qui porte son nom.

Mais pour Edison la lampe n'était que l'un des maillons d'un système électrique d'éclairage. Il étudia ainsi à partir de 1879, la constitution d'une dynamo capable de fournir une alimentation à tension fixe pour une lumière d'une intensité constante. Il développa un premier modèle appelé Longue-Taille Mary Ann dont il fit fabriquer plusieurs exemplaires. Les années suivantes, il conçut le système d'exploitation qui fut installé à New-York dans le sud de Manhattan. Le système utilisait une nouvelle dynamo, appelée Jumbo, entraînée par un moteur à vapeur. La pénétration de ce nouveau mode d'éclairage fut assez lente car beaucoup utilisaient le gaz qui avait encore leurs faveurs car bien meilleur marché.

Fort de ses premiers succès mais qui demeuraient limités, Edison partit vers le vieux continent. En 1881, il fonda une société avec des capitaux anglais en faisant appel à des scientifiques de renom comme John Hopkinson et Ambrose Fleming et commença une première installation à Holborn. En 1882, il commença l'exploitation publique de son système. Edison se heurta alors à la concurrence

Swan United Electric Company Ltd. Les négociations traînaient car Edison ne voulait pas qu'un autre nom que le sien figurât dans la raison sociale de la société. Il rappelait qu'il était le seul inventeur du système complet de production et de distribution et pas seulement celui de la lampe à incandescence. La société d'Edison et de Swan devint ensuite la General Electric qui existe encore de nos jours (GE).

La postérité de la lampe à incandescence

Les lampes d'Edison et Swan ont suscité l'intérêt et l'admiration des utilisateurs des années 1880 mais assez rapidement, lorsque l'usage commença à en être répandu, les limites de la lampe sont apparues. Le filament était fragile et ne fournissait pas une grande intensité d'éclairage ; la température ne dépassait pas 1 600°C et, par comparaison, les becs de gaz Auer fournissaient une lumière moins jaune. Les physiciens tentèrent alors de revenir au filament métallique. Le platine étant trop cher, ils se tournèrent vers les métaux rares comme l'osmium, le tantale, le molybdène et le tungstène. Dans le vide, les filaments pouvaient être portés à des températures bien supérieures à celle du carbone, de l'ordre de 1 900 à 2 200 °C.

“A partir des années 1910, l'emploi des lampes à filament de tungstène se généralisa, la lumière était plus blanche que celle du carbone et se rapprochait de la lumière naturelle.”

de la société de Swan dont le système était moins centralisé puisqu'il avait adopté le principe d'un générateur par immeuble avec la possibilité d'une installation particulière. Il y eut un début de lutte mais des négociations pour une fusion s'engagèrent qui prirent plusieurs années pour aboutir à la création d'une nouvelle société appelée Edison and

Au début du XX^e siècle des lampes à filament en osmium et en tantale furent fabriquées et commercialisées. Les filaments étaient très fins et demandaient à la fabrication des manipulations très délicates. A partir des années 1910, l'emploi des lampes à filament de tungstène se généralisa, la lumière était plus blanche que celle du carbone et se rap- ●●●

●●● prochat de la lumière naturelle. L'Américain William Coolidge mit au point en 1912 un procédé de martelage à chaud qui permit de préparer le tungstène pour obtenir des fils très fins.

Les travaux de Irving Langmuir

Jusqu'au début du XX^e siècle, il n'y eut pas beaucoup de relations entre le système technique de l'éclairage et les sciences physiques. Comme on l'a vu précédemment, c'est plutôt la chimie qui avait servi à perfectionner les dispositifs, avec d'abord Davy et la découverte de l'arc, puis les chimistes tels que Swan qui étudiaient les propriétés des matériaux. Mais au XX^e siècle ce fut le physico-chimiste américain Irving Langmuir qui provoqua des transformations radicales de l'industrie des lampes à incandescence.

“En 1906 Langmuir commença des recherches sur la formation d'oxyde d'azote à partir de l'air enfermé dans une ampoule close et munie d'un fil chauffé par un courant.”



Figure 11 : Irving Langmuir – Source : Wikipedia

En 1906 Langmuir commença des recherches sur la formation d'oxyde d'azote à partir de l'air enfermé dans une ampoule close et munie d'un fil chauffé par un courant. Il s'intéressait ainsi à l'équilibre des mélanges gazeux à basse pression. Son

montage en laboratoire ressemblait à une lampe à incandescence du commerce. Langmuir s'interrogea sur la courte durée des filaments de métal et arriva à la conclusion que c'étaient les gaz résiduels existant encore malgré les traitements du vide avant la fermeture de l'ampoule qui en étaient la cause. Par ailleurs, il constata que la réalisation d'un vide parfait était impossible et il pensa que si le vide imparfait était remplacé par une atmosphère de gaz inerte comme l'argon ou l'azote, les filaments se désintègreraient moins rapidement.

La lampe à incandescence bénéficia ainsi d'une innovation majeure car la température des lampes à atmosphère inerte pouvait atteindre 2 500°C ce qui permit d'éviter les opérations de fabrication du vide. La lampe à atmosphère inerte fut introduite en 1913 mais ne connut une généralisation

qu'au cours des années 20. Langmuir observa par la suite qu'il y avait des pertes par convection dues à la présence de gaz et il étudia finement les pertes par unité de surface. Il améliora le rendement en introduisant des filaments enroulés en spirale ce qui minimisait les pertes car le filament enroulé était beaucoup plus long.

Les lampes à décharge

L'initiateur des lampes à décharge est le physicien allemand Geissler qui avait réalisé vers 1858 des tubes à atmosphère raréfiée. Au début du XX^e siècle, l'amélioration de la constitution des électrodes et la possibilité d'utilisation des gaz rares permirent la réalisation d'appareils d'éclairage qui ont pris à partir des années 30 de plus en plus d'importance. C'est au cours des années 30 que George Claude a réalisé les premiers tubes à décharge à cathode

chaude dont la paroi interne était garnie de substance fluorescente, contenant l'un des gaz rares et de la vapeur de mercure. Ces tubes fonctionnaient sous haute tension et devaient être très longs pour répondre aux exigences de l'allumage. Au cours de la deuxième guerre mondiale, les tubes fluorescents à cathode froide sans émission ionique à la cathode, fonctionnant à basse tension ont été mis au point aux Etats-Unis. Ces tubes dits au néon sont encore largement utilisés de nos jours.

Conclusion

Bien au-delà de l'invention de la lampe à incandescence, l'histoire de l'éclairage continue et ne semble pas avoir atteint son asymptote. Le lecteur trouvera une description des diverses déclinaisons des lampes à incandescence au cours du XX^e siècle dans l'introduction de Jean-Pierre Hauet au dossier « éclairage » de la REE n° 2012-4. Le dossier du présent numéro consacré à l'éclairage et piloté par Georges Zisis, fait le point sur le développement actuel de la technologie LED.

En réalité, la lampe à incandescence d'Edison n'était pas une innovation d'un produit ou d'un composant comme l'ont été de nos jours les LED, mais l'émergence d'un système d'éclairage électrique complet et centralisé qui avait vocation à remplacer un système équivalent basé sur le gaz. Cela explique que le passage au nouveau système fut assez lent, puisque l'éclairage à gaz subsista jusqu'à la première partie du XX^e siècle. La vraie rupture dans cette histoire est celle de la révolution industrielle car durant toute l'ère pré-industrielle les lampes restèrent autonomes, avec leur propre réservoir d'énergie. L'ère industrielle les a réduites d'une certaine manière à l'état de composant, dépendant d'un système centralisé de distribution d'énergie qu'il fallut rentabiliser et donc rémunérer ce qui préfigurait les systèmes de services centralisés du monde moderne. ■

Marc Leconte

Membre émérite de la SEE.

Résumé

Tout au long de la préhistoire et de l'histoire ancienne, l'homme a utilisé le feu et la combustion pour s'éclairer quand la lumière naturelle lui faisait défaut. Le combustible a évolué, allant de l'huile à la cire ou au suif, et la lampe d'éclairage a connu des innovations visant à améliorer son fonctionnement, la qualité et la puissance de l'éclairage. Mais son principe de fonctionnement, la combustion autonome d'un combustible attaché à la lampe, est resté le même jusqu'à la révolution industrielle.

L'utilisation du charbon comme source nouvelle d'énergie et la distillation de celui-ci ont permis une nouvelle évolution des lampes avec l'utilisation du gaz comme combustible. Cette évolution en a entraîné une autre dès lors que le gaz produit dans les usines à partir du charbon parvenait aux utilisateurs par un réseau de distribution centralisé. Cela changeait la nature de l'éclairage qui devenait un service centralisé dont la gestion et le fonctionnement étaient assurés par des sociétés publiques ou privées.

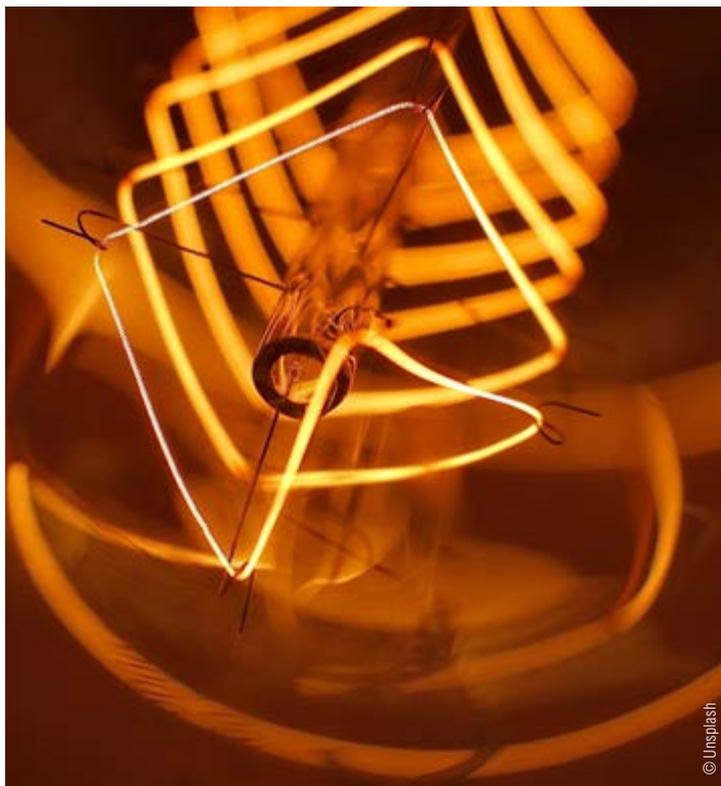
Le développement de l'électricité industrielle à la fin du XIX^e siècle a permis à des inventeurs tels Edison et Swan de mettre au point une nouvelle lampe basée non plus sur une combustion mais sur le phénomène d'incandescence. Cette lampe popularisée à la célèbre exposition universelle de 1881 a ouvert l'ère de l'éclairage moderne qui se généralisera au XX^e siècle. ■

Abstract

Throughout prehistory and ancient history, men have used fire and combustion to light themselves when they lacked natural light. Fuel has evolved from oil to wax or tallow, and the lighting lamp was improved thanks to innovations enhancing its operation and the quality and power of lighting. But its operating principle, the autonomous combustion of a fuel attached to the lamp, remained the same until the industrial revolution.

The use of coal as a new source of energy and its distillation allowed for a new evolution of lamps with the use of gas as a fuel. This development led to another one as soon as the gas produced in factories from coal reached the users through a centralized distribution network. This changed the nature of lighting, which became a centralized service, managed and operated by public or private companies.

The development of industrial electricity, at the end of the 19th century, enabled inventors such as Edison and Swan to develop a new lamp based no longer on combustion but on the phenomenon of incandescence. This lamp, popularized at the famous International Exhibition of Electricity, in Paris 1881, opened the era of modern lighting which widespread in the 20th century. ■



Références

- Schivelbusch Wolfgang (auteur), Weber Anne (traducteur). La nuit désenchantée : à propos de l'histoire de l'éclairage artificiel au XIX^e siècle. Le Promeneur, 1993.
- Dumas Maurice. Histoire générale des techniques. Quadrige/Puf, 1996.
- Figuier Louis. L'art de l'éclairage 1888 Juvet et Cie; Site Gallica
- Dossier L'éclairage ; REE n°2012-4

Quand nous sommes séduits par des vendeurs de pacotille

Nous avons tous en tête l'image de ces colonisateurs européens qui, pour amadouer les peuples des pays où ils mettaient les pieds, venaient chargés de verroteries ou de colifichets sans valeur réelle. Contre ces bimbeleries, les conquistadors obtenaient de l'or en Amérique et les navigateurs européens des esclaves sur les côtes africaines. Ce récit peut nous glacer le sang par sa rudesse et nous sommes pleins de commisération pour les peuples subvertis de la sorte. Ils furent colonisés, souvent réduits en esclavage et décimés par des maladies importées ; leur culture fut confisquée, leur religion éliminée et leur langue évincée. Eh bien ce triste sort n'est pas loin de celui qui nous attend aujourd'hui, mutatis mutandis. La menace est plus insidieuse, c'est pour cela que nous ne la percevons pas dans toute son ampleur, elle n'en est pas moins réelle.

Les nouveaux colonisateurs s'appellent notamment Google, Amazon, Facebook, Apple ou Microsoft¹, pour caractériser la principale ethnie dont ils relèvent. La pacotille qu'ils nous offrent s'appelle : réseaux sociaux, messageries Internet, plates-formes et services numérisés en tous genres. Certes ces breloques nous font rêver, comme les autochtones devaient rêver devant le brillant factice des verroteries, n'hésitant pas à en redemander. Nous ne valons pas mieux, prêts à jeter à la poubelle nos smartphones de plus de deux ans pour acquérir le dernier modèle encore plus clinquant ! Les facilités qui nous sont octroyées, en apparence gratuites, sont échangées contre peu de choses : l'accès à nos données individuelles et la transparence de nos compulsions. Le troc nous paraît avantageux d'autant que nous sommes très « accros » à ces colifichets au point même de ne pas supporter l'idée d'en être un tant soit peu privés. La contrepartie nous paraît bénigne – comme l'or pour les Aztèques ou l'ébène noir des Africains marchands d'esclaves. Pourtant, si l'on en juge par les résultats et la capitalisation boursière de la tribu des GAFAM, cela vaut de l'or au sens propre.

Nous pouvons filer la métaphore un peu plus encore pour comparer notre sort à celui des pauvres amérindiens. Nous sommes mis dans une situation de dépendance qui s'apparente à un esclavage intellectuel dont nous ne voyons pas les fers. Nous sommes contaminés par une véritable drogue car l'addiction numérique est une maladie difficile à soigner. On nous impose, à notre insu, une culture nouvelle qui se substitue à l'ancienne ; le temps passé devant l'ordinateur ou le smartphone dépasse largement le temps cumulé de la lecture des journaux et de l'écoute de la télévision. Les réseaux sociaux et leurs auxiliaires, comme « l'information en continu », font régner l'immédiat au détriment de la réflexion. Point n'est besoin de dire que l'inspiration culturelle est essentiellement



Dominique Maillard
Ingénieur général des mines
honoraire

anglo-saxonne (avant de devenir un jour, chinoise !) et va de pair avec l'abandon du français, encouragé par les élites et la frange « branchée » de la société. Nos religions « natives » ne sont déjà plus très vaillantes après deux siècles de laïcisation intensive se recommandant de la Révolution de 1789. Elles sont en passe de disparaître soit au profit d'une religion importée plus coriace (l'islam), soit au profit d'un culte « post-humaniste » aux contours mal définis mais inspiré par l'intelligence artificielle dont les GAFAM assurent aujourd'hui la promotion.

Que pouvons-nous faire ? Nous révolter ? Si l'on en croit les leçons de l'Histoire, les révoltes des peuples conquis, ou en voie de l'être, sont vouées à l'échec. En effet les colonisateurs disposent d'armes bien plus

puissantes que nos arcs rhétoriques et nos flèches verbales. Tout savoir sur chacun d'entre nous – ou presque – donne un avantage compétitif massif à ceux qui en détiennent les clés. La guerre-éclair consisterait à nous priver d'informations voire d'identité numérique, c'est-à-dire nous rayer de la carte pour toutes les interactions aujourd'hui indispensables dans la vie courante. Pourrait-on survivre longtemps sans carte bancaire, sans carte vitale et sans Internet ? Reste donc la voie de la soumission, chère à certains écrivains. Je l'exprimerais de manière plus positive. Si les Amérindiens ont survécu jusqu'ici, s'il existe encore quelques Aborigènes, si les Africains continuent à peupler l'Afrique et sont présents en nombre sur d'autres continents, c'est qu'ils ont su s'adapter. Certes en perdant beaucoup de leur identité au passage mais aussi en assimilant la culture des dominants pour mieux s'en affranchir à leur façon. C'est le défi qui s'offre à nous. A défaut de pouvoir nous passer des technologies qui nous sont imposées – car c'est de cela qu'il s'agit – nous devons les maîtriser pour en faire des outils au service de nos propres causes. Concrètement cela veut dire : imposer nos règles de protection des données (la RGPD² est un essai encore maladroit et bureaucratique mais significatif en ce sens) ; définir des principes fiscaux faisant disparaître l'exterritorialité de l'imposition des GAFAM ; appliquer sans fléchir les principes que devraient connaître ces entreprises dans leur pays d'origine, comme les lois anti-trust ou des amendes astronomiques pour un oui ou un non ; favoriser, comme les Chinois le font avec succès, l'émergence de vrais concurrents brisant les monopoles de fait en train de s'établir. La Commission de Bruxelles serait bien inspirée d'en prendre l'initiative plutôt que de tuer dans l'œuf toute velléité de regroupement d'entreprises industrielles européennes. A ce prix, nous pouvons espérer que nos enfants et nos petits-enfants retrouveront la fierté de défendre une culture autonome tout en étant à la pointe du modernisme technologique. Le tout n'en déplaît aux « collapsologues » et autres « effondristes » qui ne sont que les complices dissimulés de nos colonisateurs numériques. ■

¹ Souvent baptisés GAFAM par le sigle de leurs initiales respectives.

² Règlement général sur la protection des données. En application d'une directive européenne de même nom.



André Merlin

Président d'honneur de RTE
Ancien président de Cigre

La maîtrise des grands systèmes électriques

Un enjeu majeur à l'heure de la transition énergétique et du développement des énergies renouvelables

L'ouverture des marchés de l'électricité et le développement rapide des énergies renouvelables intermittentes accroissent la complexité des systèmes électriques, dont la défaillance est de moins en moins acceptable dans nos sociétés. Sur la base de son expérience, André Merlin revient sur les risques encourus et dresse un tableau des solutions pour mieux les maîtriser.

REE : La transition énergétique se traduit, notamment, par une évolution des modes de production de l'énergie électrique, avec un accroissement rapide de la part des énergies renouvelables. Quelles réflexions cette évolution vous inspire-t-elle ?

André Merlin : Un grand système électrique comme celui que nous développons en Europe depuis la fin de la Première Guerre mondiale est un système complexe. L'Académie nationale d'ingénierie des États-Unis est même allée jusqu'à dire qu'il constituait le système le plus complexe créé et réalisé par l'esprit humain au vingtième siècle. Très vite, bien avant l'ouverture des marchés, on s'est aperçu que pour ma-

triser cette complexité, il fallait disposer d'outils d'aide à la décision.

Cette complexité tient principalement au fait que l'électricité n'est pas stockable directement. Il faut donc en per-

“Le système le plus complexe créé et réalisé par l'esprit humain au vingtième siècle...”

manence procéder à un équilibrage entre l'offre et la demande qui est très variable au cours de l'année, de la semaine et de la journée. Pour que cette

opération soit réalisée dans des conditions techniques acceptables du point de vue des équipements du réseau, il importe de contrôler de manière continue trois paramètres décisifs : la fréquence (avec, en Europe, une référence de 50 Hz et une plage admissible située entre 49,5 Hz et 50,5 Hz), la tension et le courant. Il faut savoir que tout écart par rapport aux valeurs de référence fait courir au réseau un risque considérable, celui d'un effondrement complet du système électrique (blackout).

La France a connu deux blackouts : le 19 décembre 1978, tout le pays a été plongé dans l'obscurité pendant près d'une journée ; en 1987, l'obstruction par la glace des prises d'eau de la centrale de Cordemais a conduit à l'arrêt de sa production d'électricité et l'instabilité de

●●● tension qui en a résulté a entraîné une coupure généralisée dans tout l'Ouest de la France. Et en novembre 2006, notre pays a failli connaître un nouveau black-out à cause d'un incident survenu en Allemagne du nord qui a eu des conséquences lourdes sur l'ensemble du réseau européen. Pour la collectivité, et donc pour les pouvoirs publics, un tel risque est aujourd'hui inacceptable, tant la dépendance de l'ensemble des activités humaines à l'énergie électrique est grande. Pour assurer l'équilibre entre l'offre et la demande, le gestionnaire de transport peut procéder à deux types de coupures d'électricité : programmées dans le cadre de l'effacement ou immédiates et sans préavis dans le cadre de l'interruptibilité, essentielle pour éviter l'écroulement du système électrique. C'est grâce à ce dernier dispositif qu'on a échappé au blackout européen lors de l'incident de novembre 2006.

“Le marché de l'électricité a ajouté des degrés de complexité mais la sensibilité de la collectivité à la disponibilité de l'électricité s'accroît.”

REE : Par rapport à cette complexité et aux risques qui y sont associés, quel rôle ont joué –ou jouent encore – les évolutions majeures du secteur électrique que l'on connaît depuis une vingtaine d'années ?

A.M. : Le marché de l'électricité européen mis en place à partir des années 1990 a ajouté des degrés de complexité dans le système électrique. Premièrement,

pour donner la possibilité à chaque client de choisir son fournisseur partout en Europe selon le principe de l'accès des tiers au réseau, il a fallu traduire les échanges commerciaux en flux physiques et créer une infrastructure informatique et des bourses de l'électricité en Europe. Deuxièmement, le développement des énergies renouvelables à caractère intermittent induit la nécessité de compenser les variations de production par d'autres moyens de production pilotables. Et la difficulté provient notamment du fait que, en même temps que les degrés de complexité s'ajoutent, la sensibilité de la collectivité à la disponibilité de l'électricité s'accroît, puisque l'électricité est indispensable à toutes nos activités.

Relativement au maintien permanent de l'équilibre offre-demande, un stockage massif de l'énergie dans des équipements raccordés au réseau pourrait en théorie constituer une solution à ce problème, mais on voit les limites de cette solution :

- concernant le stockage dit gravitaire, limitation du nombre de sites susceptibles d'accueillir des stations de pompage (même s'il en reste quelques-uns) ;
- concernant le stockage électrochimique, problèmes de coût, sauf rupture technologique aujourd'hui imprévisible.

La conclusion à laquelle on arrive assez vite, c'est donc que si ces énergies renouvelables intermittentes se développent, il sera indispensable de disposer de moyens de puissance garantie, obtenue par des systèmes de production conventionnels capables d'assurer un suivi de charge. Aujourd'hui, en France, c'est principalement le nucléaire qui joue ce rôle, grâce à la capacité de pilotage que la filière nucléaire française a développée alors qu'elle était absente de la filière américaine à l'origine de ces centrales. En Espagne ce sont des centrales au gaz ; en Allemagne, ce sont des centrales au charbon, auxquelles se substituent progressivement des centrales au gaz.

REE : Ce que vous nous dites va à l'encontre de certaines idées qui ont eu cours, selon lesquelles le taux d'énergies renouvelables dans un système électrique pourrait croître sans limites.

A.M. : En effet ces idées s'appuient sur des études plus que contestables, allant par exemple jusqu'à envisager « un mix électrique 100 % EnR ».

Elles sont contestables à la fois sur le plan technique (opérabilité du système) et sur le plan économique : non-prise en compte de l'incidence économique du caractère intermittent de certaines EnR, qui impose de prévoir d'autres moyens en complément et qui rend non pertinentes des comparaisons, faites sans précautions, de prix de kWh entre énergies intermittentes et énergies provenant de centrales pilotées. Le rapprochement d'un prix du MWh d'origine éolienne avec celui d'un MWh d'origine nucléaire (« grand carénage » compris), respectivement donnés pour 64 et 62 euros par MWh, n'a guère de sens. La filière éolienne étant par nature intermittente, il faut prendre en compte la production garantie nécessaire pour pallier l'absence de vent. Jean-Marc Jancovici a d'ailleurs démontré que l'absence de moyens de production pilotables conduit à une explosion du prix de l'énergie.

REE : Pourtant, si l'on suit l'économiste américain Jeremy Rifkin, la décentralisation de la production d'électricité, qui accompagne le développement des EnR, pourrait permettre des économies sur celui des réseaux électriques...

A.M. : Cette idée est fautive. Au niveau de la distribution, c'est évident puisque le caractère non garanti des productions solaires ou éoliennes ne permet pas de réaliser ces économies théoriques et que ces nouveaux moyens de production doivent être raccordés au réseau. Mais c'est surtout au niveau du réseau de grand transport et d'interconnexion

“Des idées fausses à combattre.”

que le développement des moyens de production intermittents doit s'accompagner de nouveaux investissements, notamment d'un renforcement des interconnexions internationales. Ces interconnexions sont indispensables, à la fois pour renforcer la solidarité entre les pays face aux aléas de l'offre et de la demande, pour permettre l'intégration des marchés de l'électricité et pour intégrer les EnR en profitant d'un certain foisonnement des productions à l'échelle continentale.

C'est donc à juste titre que la Commission européenne encourage la création de nouvelles interconnexions, notamment entre la France et les pays voisins : péninsule ibérique, Italie, Irlande, Royaume-Uni. Le problème est que ces ouvrages coûtent de plus en plus cher parce qu'ils passent soit sous la mer, soit sous la terre, en raison de la difficile acceptabilité de l'implantation de pylônes à très haute tension, comme nous avons pu le voir avec le projet de ligne France-Espagne. La question se pose de savoir jusqu'où aller dans le développement des interconnexions. Il y a un calcul à faire pour montrer que ces opérations sont rentables. C'est aux gestionnaires du réseau de mettre en évidence ces atouts dans les discussions avec la Commission.

REE : Ira-t-on jusqu'à des interconnexions intercontinentales ?

A.M. : Peut-être. Des projets en ce sens existent. J'en citerai deux.

D'une part une interconnexion de grande capacité entre l'Europe et l'Afrique, qui pourrait, selon les moments, fonctionner dans l'un ou l'autre sens : de l'Afrique vers l'Europe pour tirer parti des immenses ressources en énergie solaire des zones sahariennes et subsahariennes et de l'Europe vers l'Afrique pour garantir l'alimentation des

régions concernées aux heures où cette énergie n'est pas présente. C'est techniquement réalisable, même si l'impact sur le fonctionnement des systèmes reste à approfondir. Et les difficultés politiques d'un projet de ce type ne nous échappent évidemment pas.

L'autre projet d'interconnexion intercontinentale a été évoqué par nos collègues chinois de State Grid Corporation of China lors du Cigre de 2012 à Paris. Il s'agit de relier la région de Pékin à l'Europe continentale pour profiter du décalage horaire des activités entre ces zones. Lors de sa présentation en 2012, le président de SGCC alla jusqu'à donner une estimation du prix du MWh livré dans la partie orientale de l'Allemagne. L'utilisation de niveaux de tension très élevés (de l'ordre d'un million de volts) permet de l'envisager sur le plan technique, mais la rentabilité économique d'un tel projet reste à démontrer.

REE : Revenons-en aux problèmes techniques découlant du développement des énergies renouvelables et aux limites que les contraintes d'exploitation des réseaux électriques peuvent imposer à ce développement. Avant de se concentrer sur l'Europe et la France, quels enseignements peut-on tirer d'autres expériences ?

A.M. : Au-delà de la nécessité de compenser le caractère intermittent des sources de production par énergies renouvelables, la perte de stabilité de la tension est un risque majeur, mis en évidence par de nombreux incidents majeurs intervenus récemment. Quelques exemples récents l'illustrent :

- en 2016, une série de blackouts subie par l'Australie a eu des répercussions sociales et politiques importantes, à la suite desquelles le gouvernement d'Australie du Sud a décidé de commander de nouveaux moyens de production thermique ;
- en 2017, à Taiwan, à la suite d'un blackout majeur, le referendum organisé a conduit à la décision de conserver le nucléaire ;

- au Royaume-Uni, un incident majeur a eu lieu en août 2019. A l'origine de cette panne, la perte de production thermique mais aussi de fermes éoliennes en mer. Le gestionnaire du réseau de transport, National Grid, en a tiré les conséquences et vient de lancer un appel à projets, dont l'objet est d'accroître l'inertie électromécanique du système. En Europe continentale, on est peut-être moins sensible, actuellement, à ce risque, notamment parce que les « petits » pays qui affichent des taux de renouvelables importants s'appuient sur les interconnexions pour maintenir la stabilité de la tension. Mais le risque demeure potentiellement présent, et c'est la raison pour laquelle pour laquelle l'arrêt de centrales à charbon doit être compensé, a minima, par la mise en service de centrales à gaz.

“Il faut développer les interconnexions internationales, mais jusqu'où ?”

REE : En Europe, justement, et notamment en France, où en sommes-nous par rapport à ces risques et où sont les limites à ne pas dépasser ?

A.M. : Il faut bien comprendre que la production électrique d'origine éolienne ou photovoltaïque n'apporte pas naturellement l'inertie que fournissent les machines tournantes des centrales thermiques ou hydrauliques. Et cette inertie est fondamentale pour assurer le bon fonctionnement du système électrique, avec l'ensemble de ses automatismes. Il n'est pas possible, compte tenu de la diversité des situations, d'établir une loi établissant rigoureusement la part de la production d'origine renouvelable acceptable dans un grand système électrique. Ainsi si l'éolien et le photovoltaïque contribuent bien à la fourniture en énergie, ils ne contribuent pas né- ●●●

●●● cessairement aux besoins en capacité. Une étude de la direction R&D d'EDF¹ évoque un taux de production éolienne et photovoltaïque de l'ordre de 40%, ordre de grandeur assez couramment admis.

“Il faut des machines tournantes (centrales thermiques, hydrauliques ou nucléaires), pour maintenir la stabilité du système.”

Dans la situation actuelle, on peut estimer qu'il n'y a pas de risque majeur, mais le gouvernement français nourrit des objectifs ambitieux quant à son mix énergétique. Il prévoit une production d'électricité par les énergies renouvelables bien plus importante. Par exemple, un de ses objectifs est de voir l'éolien, le solaire, l'hydraulique et les bioénergies représenter 32 % de son mix énergétique en 2030. Compte tenu de la croissance de la part de l'électricité dans l'énergie totale consommée, ce chiffre de 32 % du mix énergétique pourrait correspondre à près de 55 % du mix électrique; en retranchant la production hydro-électrique du total des énergies renouvelables, puisque les centrales hydrauliques contribuent à la tenue de la tension, on voit que la part de la production d'origine renouvelable dans le mix électrique pourrait approcher de 50 %, ce qui montre qu'il est temps de commencer à s'en préoccuper.

Outre la question technique cruciale de la sécurité de fonctionnement du

système, un autre sujet me semblerait devoir être traité rapidement, en lien avec le développement des énergies renouvelables : elle concerne le fonctionnement du marché de l'électricité et les règles d'appel aux différents moyens de production. Les situations de coûts marginaux négatifs, foncièrement choquantes, se rencontrent de plus en plus fréquemment ; elles sont liées au principe de l'obligation d'achat des productions d'origine renouvelable, notamment éoliennes et photovoltaïques, en contradiction évidente avec les principes régissant l'appel aux divers moyens de production. Cette contradiction est gérable tant que la production par énergies renouvelables est marginale. Là aussi, il est grand temps de se préoccuper de ce problème et de mettre en place une solution assurant un fonctionnement plus fluide du système : à court terme, on pourrait par exemple introduire les énergies renouvelables dans le marché, en les faisant bénéficier d'un bonus raisonnable.

REE : Pour repousser les limites, notamment en termes d'acceptabilité des EnR intermittentes dans le système électrique, on évoque diverses solutions : la gestion de la demande, notamment par des « effacements de charge », l'accroissement des moyens de stockage, y compris en utilisant les batteries des véhicules électriques, l'apport de réseaux de distribution intelligents, les microgrids, une meilleure coordination des moyens de contrôle du système au niveau européen, etc. Quelles sont les mesures qui vous semblent les plus efficaces, voire les plus urgentes ?

A.M. : Vous évoquez un grand nombre de solutions permettant de repousser les limites du système. Parmi elles, les possibilités d'effacement sont fondamentales. Cette mesure doit évidemment concerner les grands industriels comme les autres professionnels et les consommateurs domestiques. Pour

maîtriser la gestion de l'effacement parmi cette clientèle diffuse et le faire dans le respect de la sécurité des personnes, il faut mettre en place des agrégateurs travaillant en lien avec le gestionnaire du réseau de transport. Les réseaux de distribution intelligents, dont le compteur communicant (en France, Linky) est la pierre angulaire, ont aussi leur rôle à jouer.

Les microgrids, dont l'émergence, notamment en Allemagne, irait dans le sens d'une évolution sociétale vers des communautés énergétiques locales, seraient aussi à prendre en compte ; en France, ils se heurteraient toutefois au risque de remise en cause de la péréquation tarifaire, à laquelle de nombreux acteurs sont très attachés. Parmi eux, notamment, la Fédération nationale des collectivités concédantes et régies, ainsi que le principal gestionnaire de réseaux de distribution français, Enedis. De même le développement de l'autoconsommation, subventionné par la collectivité, se ferait au détriment des investissements collectifs, avec un risque de remise en cause de la péréquation.

Le développement du stockage de l'énergie en réseau est la solution la plus couramment évoquée ; toutefois on a déjà évoqué, précédemment, les limites de cette solution, dans le cadre des technologies actuelles : en ce qui concerne le stockage par batteries, la contrainte est économique, même si le coût du stockage stationnaire connaît des baisses spectaculaires qui devraient se poursuivre. Elle est peut-être aussi écologique. Le stockage gravitaire dans des stations de pompage se présente dans de meilleures conditions économiques, mais les sites susceptibles d'être équipés sont maintenant, en France, géographiquement limités.

Quant à l'utilisation des batteries des véhicules électriques en appui à l'équilibre offre-demande sur le réseau, dispositif dit Vehicle to Grid, c'est une idée séduisante. La piste mérite d'être explorée, même si elle est actuellement au stade de la R&D. Là aussi, la mise en place d'agrégateurs sera nécessaire.

¹ On pourra se reporter au dossier « enjeux d'un développement massif des EnR dans le système électrique européen du futur », publié dans la REE 2016/5.

REE : Toutes ces solutions améliorent la robustesse du système mais, en même temps et paradoxalement, augmentent sa complexité. Au-delà de ces solutions, la maîtrise de la complexité du système européen peut-elle encore être améliorée par des mesures concernant la gestion et le pilotage du système ?

A.M. : Oui, des progrès peuvent sans doute encore être faits, même si la création d'ENTSO-E (European Network of Transmission System Operators for Electricity) a déjà constitué une avancée notable. Sa compétence doit être étendue, ce qui suppose notamment des transferts de compétences et une meilleure coordination des gestions prévisionnelles. Il ne s'agit pas d'avoir un centre de conduite unique du réseau européen mais de mieux les coordonner, à la fois en termes de temps réel et de gestion prévisionnelle. L'expérience a en effet montré que des incidents graves ont été, au moins en partie, imputables à des incompréhensions entre centres de conduite.

La coordination entre gestionnaires de réseaux de transport est bénéfique au système, tout en préservant un contrôle national. Cela a justifié, en Europe, la création de CORESO, qui regroupait initialement, fin 2008, RTE et son homologue belge ELIA et qui regroupe désormais de nombreux autres systèmes électriques, du Portugal à l'Irlande en passant par l'Italie. Aux Etats-Unis, le cas du gestionnaire PJM (Pennsylvanie-New Jersey- Massachussets) en est une autre illustration, avec une zone de coordination qui s'est étendue sur de nombreux autres états depuis son lancement.

Pour aller dans ce sens, on pourrait imaginer, concernant l'Allemagne, de passer de quatre centres de conduite à un seul centre de coordination, ou au maximum deux.

Ces progrès vers une meilleure coordination de la conduite du système européen prendront certainement du temps, mais ils sont nécessaires.

REE : Dans le débat public concernant les questions énergétiques, il nous semble que les questions importantes que nous venons d'évoquer sont peu présentes. Il est vrai qu'elles sont complexes. Que faire pour sensibiliser, voire pour convaincre nos concitoyens ?

A.M. : Il faut que les ingénieurs s'expriment davantage qu'ils ne le font aujourd'hui. Il est grand temps de s'en occuper.

REE : Vous êtes maintenant adjoint au maire de votre commune de naissance (Pleaux) et vice-président du Syndicat départemental des énergies du Cantal. A la lumière de cette expérience nouvelle, comment voyez-vous le rôle des autorités locales dans la transition énergétique ?

A.M. : Les collectivités locales ont un rôle majeur à jouer dans le cadre de la transition énergétique. L'expérience que j'ai pu avoir, ces dernières années, dans ma commune et dans mon département, montre que leurs interventions concernent, d'abord, la maîtrise de la demande.

“Un taux limite de renouvelables atteint vers 2030 ?”

Par exemple, dans ma commune, la rénovation de l'éclairage public qui a permis de diviser par quatre la puissance souscrite, la rénovation du chauffage de la piscine municipale avec installation d'une pompe à chaleur à la place d'un chauffage par résistances électriques, le chauffage de la mairie et de la poste en remplaçant la chaudière à fuel par une chaudière à granulés-bois, etc.

Les collectivités interviennent aussi dans d'autres domaines, tels que l'installation de bornes de recharge de véhicules électriques et, surtout, les politiques d'installation de moyens de production d'électricité par énergies renouvelables. Dans mon département, si nous avons, pour des raisons environnementales, une forte réticence vis-à-vis de l'implantation d'éoliennes, nous promovons des projets de centrales solaires au sol, dont l'un est associé à un projet agricole-solaire. Mais nous nous heurtons à un problème de sous-équipement en réseau (poste source saturé et trop éloigné...), qui nous conduit à nous intéresser aux schémas de raccordement des énergies renouvelables planifiés par Enedis et RTE. Les collectivités sont ainsi associées à la planification énergétique, mais peut-être sans maîtriser toutes les compétences qui seraient nécessaires pour cela.

REE : En guise de conclusion, comment voyez-vous le réseau électrique français, disons en 2050 ?

A.M. : Le réseau de transport a un bel avenir devant lui. Par rapport au réseau actuel, celui de 2050 sera beaucoup plus souterrain, y compris en haute et très haute tension, jusqu'aux interconnexions internationales. Celles-ci se seront encore largement développées, jusqu'à une échelle intercontinentale. Le courant continu aura pris une place plus importante aux deux extrémités de la chaîne (grandes interconnexions et réseaux locaux).

Mais surtout le réseau devra, sauf ruptures technologiques majeures que l'on ne voit pas se profiler, rester appuyé sur des centrales solides assurant sa stabilité : centrales nucléaires, si l'on parvient à en mettre en service de nouvelles, ou centrales à gaz, malgré les inconvénients en termes de gaz à effet de serre.

Mais je ne suis pas devin... ■

**Propos recueillis par
Jacques Horvilleur**



En tant que membre de la SEE, vous bénéficiez de nombreux avantages



Élargir son réseau professionnel par la participation à des structures de réflexion adaptées

• **6 Clubs techniques**

- Cybersécurité et réseaux Intelligents
- Ingénierie des systèmes d'information et de communication
- Radar, sonar et systèmes radioélectriques
- Stockage et nouveaux moyens de production
- Eco-conception en génie électrique
- Systèmes électriques

• **6 groupes régionaux**

- **Le cercle des entreprises**
- **Le cercle histoire**



Participer et bénéficier de tarifs préférentiels pour les Conférences et Journées d'études SEE

- Conférences nationales et internationales
- Journées d'études thématiques
- Conférences-débats
- Congrès internationaux, en partenariat ou non avec d'autres sociétés scientifiques



Consulter et télécharger gratuitement les publications (REE et 3EI) en version numérique et s'abonner aux publications papier à tarif préférentiel

- **La Revue de l'électricité et de l'électronique (REE)** est destinée aux ingénieurs, chercheurs, enseignants, décideurs techniques et économiques intéressés par les secteurs de l'électricité, de l'électronique, de l'information et de la communication. Paraissant cinq fois par an, la revue s'articule autour de dossiers techniques, flash-infos, articles invités, entretiens avec des personnalités du monde de la recherche et de l'industrie.
- **La revue 3EI** est une publication trimestrielle destinée aux professeurs, universitaires et industriels concernés par l'enseignement de l'électricité et de l'électronique industrielle.



S'engager dans une association qui reconnaît les talents et crée une émulation parmi ses membres

- Grades senior et émérite SEE
- Remise de prix et trophées pour les professionnels confirmés, jeunes actifs et étudiants (Brillouin-Glavieux, général Ferrié, André Blanc Lapierre...)
- Remise de médailles (Ampère, Blondel...)

→ *Pour rejoindre la SEE, deux modes d'adhésion :*



Adhésion individuelle :
via le site www.see.asso.fr
ou le bulletin d'adhésion



Adhésion collective :
partenariat d'entreprise ou
d'école via des conventions

NOUS CONTACTER :

SEE - Service adhésions - 17 rue de l'amiral Hamelin - 75783 Paris CEDEX 16 - France.
01 56 90 37 17 - adhesion@see.asso.fr - www.see.asso.fr

A propos de la culture numérique

Entretien avec Dominique Cardon

Professeur de sociologie à Sciences Po

Directeur du Medialab

La REE a récemment publié, dans son n° 2019-3, une recension de l'ouvrage récent de Dominique Cardon, consacré à la culture numérique. Nous avons pensé utile de compléter cette recension par quelques questions à l'auteur sur cette ouverture vers la grande rupture technologique que constitue l'entrée du numérique dans la société contemporaine.



travailler sur les questions numériques au milieu des années 90, au moment où le Web commençait juste à prendre son essor.

J'étais alors très intéressé par la question de la prise de parole des publics dans les médias classiques, le courrier des lecteurs, la prise de parole des auditeurs à la radio dans l'émission de Ménie Grégoire ou une émission de RTL qui s'appelait « Les auditeurs ont la parole ». J'analysais, au standard de l'émission, les critères qui étaient utilisés pour savoir si un auditeur pouvait passer

« page perso » sur le Web pour s'exprimer. Cela m'a d'emblée intéressé et je me suis plongé dans le Web.

Lorsque l'on étudie les mondes numériques, on entre dans des univers complexes, parfois techniques, parfois un peu élitistes et fermés, et cela donne évidemment envie d'ouvrir ces boîtes noires et d'aider les autres à les décoder.

REE : Votre passion de sociologue vous a conduit à investir un champ très large des sciences humaines : pour comprendre l'importance du numérique dans le monde contemporain, il faut aussi se faire historien, économiste... et même parfois ingénieur

D.C. : J'ai toujours pensé que la première nécessité pour un chercheur était d'être solidement installé dans sa discipline, la sociologie en ce qui me concerne. J'ai toujours un peu d'inquiétude devant certaines revendications de transdisciplinarité, qui prétendent se déployer hors-sol. Mais une fois installé dans sa discipline, rien n'interdit d'être curieux et de s'ouvrir vers les autres domaines. ●●●

REE : D'où vient votre vocation de sociologue et votre volonté de comprendre la société numérique? Votre engagement pédagogique est-il lié à ce domaine de recherche?

Dominique Cardon : Pendant mes études, je souhaitais être journaliste et je pense que cette idée d'associer la recherche la plus fondamentale à la nécessité d'en partager les résultats avec le public en découle. J'ai commencé à

“Le numérique a déjà toute une histoire !”

à l'antenne ou ne pouvait pas passer. Et, brusquement, le Web est arrivé et il est apparu évident que la configuration même de l'espace public allait être bouleversée. Plus besoin de passer par le filtre bien compliqué du standard pour parler en public, il suffisait d'ouvrir une

- La curiosité est en effet particulièrement requise dès qu'on aborde l'étude des mondes numériques. La transition numérique a déjà toute une histoire ; elle traverse tous les secteurs de notre vie et c'est pourquoi il m'a semblé important, pour fabriquer ce cours d'introduction à la culture numérique, de mobiliser de très nombreuses approches de sciences sociales. On pourrait dire que ce qui fait « culture », en tout cas dans un enseignement introductif de ce type, c'est bien de comprendre les articulations entre ces différentes disciplines et d'apprendre justement à être attentif à la manière dont elles interagissent.

“Avec le numérique, des méthodes nouvelles dans les sciences sociales.”

Un exemple illustratif : les choix économiques de Facebook ont des conséquences sur les paramètres de ses algorithmes, qui en retour ont des effets sur la forme de la sociabilité en ligne des internautes, effets qui eux-mêmes peuvent avoir des conséquences politiques. On a vu cela avec la mobilisation récente des gilets jaunes, laquelle a bénéficié de l'accent mis par la plateforme américaine sur la visibilité des informations postées dans les groupes locaux. Dans cette articulation du social, du culturel, de l'économique et du politique, la technique joue un rôle pivot et c'est pourquoi il me paraît si important de la comprendre, d'étudier et de comprendre ceux qui la fabriquent et comment ils la fabriquent.

REE : Votre ouvrage, fruit d'un enseignement mûri au fil des ans, se présente à bien des égards comme un manuel : n'y-a-t-il pas un paradoxe, un oxymore, à mêler ainsi culture numérique et manuel ?

D.C. : Oui sûrement. Mais j'espère quand même qu'il ne s'agit pas d'un manuel barbant et didactique. A l'origine de cet ouvrage, il y a effectivement un cours d'introduction à la culture numérique que je donne depuis des années. Je l'ai testé, transformé, renouvelé de nombreuses fois pour aboutir à ce résultat publié.

La direction de la scolarité de Sciences Po a souhaité que l'ensemble des étudiants de seconde année du collège universitaire aient un cours obligatoire de culture numérique. Comme ils sont 1 600 sur sept campus différents il fallait donc enregistrer le cours sous la forme d'un SPOC (small private online course). Je pensais alors naïvement que l'exercice consistait à se placer devant une caméra pour donner ce cours, que je connais presque par cœur. En réalité, il faut écrire ce que l'on va dire, parler devant un prompteur, pour s'assurer de la précision des informations, de l'organisation des arguments et de la qualité de la transmission. L'ouvrage est donc la version écrite d'un cours qui a d'abord été pensé pour être parlé, ce qui ne me semble pas habituel en matière d'enseignement.

REE : Quel est le rôle exact du Médialab que vous dirigez ? J'imagine qu'il entretient des liens autant avec la médiologie de Régis Debray qu'avec les recherches sur la socio-technique de l'Ecole des Mines.

D.C. : Le Médialab est un laboratoire de recherche de Sciences Po qui rassemble des chercheurs en sciences sociales, des designers et des informaticiens, avec un projet intellectuel très spécifique : il s'agit d'explorer les transformations de nos sociétés avec des outils et des méthodes numériques. L'intuition de son fondateur, Bruno Latour, est que les sciences sociales ont désormais à leur disposition un nouvel instrument de connaissances : celui-ci s'appuie sur la nouvelle disponibilité des données, des logiciels de capture et d'analyse des données ainsi que sur



les techniques de visualisation, toutes possibilités désormais rendues possibles par le numérique.

Avec ces nouvelles méthodes, il est possible de produire des représentations, des techniques d'exploration et des formes de publication qui sont différentes du travail académique classique. Ainsi sur des sujets aussi variés que la circulation des œuvres d'art, l'espace médiatique et la circulation de l'in-



“Les étudiants sont très “agiles”, mais ça ne suffit pas !”

formation, les nouvelles mobilisations autour du climat, nous menons des projets de recherche qui utilisent ces méthodes. Au cœur de ce projet, il y a l'idée que nos sociétés sont désormais

profondément travaillées et traversées par le développement des sciences et des technologies, qu'il est essentiel, même dans une école de sciences politiques, d'étudier et d'observer les grandes transformations que suscite ce couplage avec les technologies.

A vrai dire, la médiologie de Régis Debray est une aventure intellectuelle originale, mais aussi fragile intellectuellement, et elle n'est vraiment pas au

cœur des références du laboratoire. En revanche, ce que l'on appelle l'anthropologie des sciences et des techniques, cette manière d'être toujours attentif aux rôles que la technique joue dans les phénomènes sociaux, est tout à fait essentiel pour le Médialab. Le Centre de sociologie de l'innovation de l'Ecole des mines a été – et est toujours – l'un des foyers les plus inventifs de ce courant de recherche.

REE : Avez-vous déjà constaté, chez vos étudiants, des éléments nouveaux de culture numérique: ils arrivent à Sciences Po après une dizaine d'années de scolarité. Les façons d'apprendre comme les choses apprises doivent évoluer, indépendamment des programmes...

D.C. : Les étudiants sont agiles avec les outils numériques – c'est d'ailleurs souvent cela que désigne l'expression *digital natives*. Mais cela ne veut pas dire qu'ils possèdent une vraie culture numérique. C'est d'ailleurs un peu le pari de notre enseignement, – apprendre à décoder le numérique – qui est aussi l'objet de ce livre, mais cet apprentissage est inséparable aussi d'une pratique du numérique, ce que nous essayons aussi d'enseigner à Sciences Po. Coder/décoder, c'est je crois l'originalité d'un enseignement du numérique. Les nouvelles générations développent effectivement des compétences originales pour faire cela et il me semble que l'on peut du coup imaginer des formats pédagogiques nouveaux pour cela. Je demande aux étudiants de faire en groupe une enquête sur un sujet de « culture numérique », mais cette enquête ne doit pas être rendue sous la forme d'une dissertation ou d'un rapport écrit. Ils doivent la rendre en numérique en mobilisant les nouvelles ressources narratives de l'écriture numérique (vidéo, podcast, site web, visualisation de données, cartographie, etc.). Le faire et le comprendre sont intimement liés.



- **REE : Et chez vos collègues ? Quelles évolutions percevez-vous dans les pratiques professionnelles des enseignants, que ce soit en amont dans le secondaire ou dans le supérieur. Les évolutions sont-elles génératrices de nouveaux clivages, de nouvelles inégalités ?**

D.C. : Je ne connais pas assez la situation d'ensemble et c'est assez difficile à évaluer pour moi ; à vrai dire il me semble que les innovations pédagogiques n'ont pas nécessairement besoin d'utiliser du

“Un enseignement devenu obligatoire à Sciences Po.”

numérique (surtout dans certains emplois qui sont assez « gadget »). En revanche, il est intéressant de prendre la mesure des effets du numérique sur la situation des apprenants pour développer de nouvelles formes pédagogiques. Les étudiants ont un accès facile et immédiat à un volume considérable d'informations. Ce qui importe désormais, n'est pas qu'ils acquièrent la connaissance mais qu'ils sachent trier et évaluer la qualité des sources, qu'ils soient en mesure d'organiser les savoirs, de les synthétiser et bien sûr d'en produire de nouveau.

REE : Et vous-même, inclinez-vous à l'optimisme, quant aux possibilités des démocraties à contenir l'appétit des GAFA et à préserver le “bien commun” que constitue l'espace public numérique ?

D.C. : Nous sommes désormais entrés dans une nouvelle ère du déploiement de la grande transition numérique. Aux promesses, ont succédé les désillusions et on mesure de mieux en mieux les risques que les monopoles marchands, le développement de la surveillance et

toute une série d'autres phénomènes font peser sur la promesse initiale d'un espace public élargi. La publicité, le filtre des algorithmes, la multiplication des opérations destinées à manipuler l'opinion constituent de nouveaux risques. Ils ne sont pas négligeables et appellent une certaine vigilance, dont l'éducation numérique fait partie.

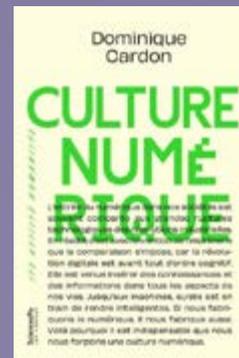
Mais il faut aussi faire attention à ne pas jeter le bébé avec l'eau du bain. En réalité, nous n'avons jamais accédé à autant d'informations ; l'intérêt et la curiosité pour l'information n'ont jamais été aussi vifs ; les soi-disant « bulles de filtre » sont percées de partout et, contrairement à ce que laisse entendre le débat sur les fake news, les internautes ne sont pas si naïfs et manipulables que cela.

Nous sommes toutefois à un tournant. Les règles du jeu de la production de l'espace public sont en train de changer radicalement. La forme verticale d'un système d'information contrôlé par les élites pour un public passif est bien morte, mais il ne faut pas imaginer qu'une meilleure régulation de l'Internet, avec la fin de l'anonymat ou des contenus haineux, parviendrait à nettoyer le nouvel espace d'expression et de circulation qui s'est désormais ouvert.

La possibilité, dont disposent aujourd'hui les internautes de s'exprimer et de mettre en partage les informations, produit toute une série d'effets positifs mais aussi, nous sommes aujourd'hui en train de le découvrir, très toxiques. Et c'est bien pourquoi, il est indispensable, à travers l'éducation et l'apprentissage de la culture numérique, de faire en sorte que nous utilisions, tous, mieux les potentialités des outils numériques.

En conclusion, et avec les remerciements de la REE, on peut, on doit souhaiter que la formation des ingénieurs, de plus en plus marquée par la diffusion du numérique dans de nouveaux domaines, comporte une ouverture culturelle, à l'image de ce que fait, avec votre concours, la Fondation Nationale des Sciences Politiques. ■

**Propos recueillis par
Bernard Ayrault**



À propos

Dominique Cardon est diplômé de Sciences Po et habilité à diriger des recherches (Université Paris-Est Marne-la-Vallée). Professeur associé à Marne-la-Vallée de 2003 à 2016, il a aussi été chercheur au Laboratoire des usages du centre de recherche d'Orange Labs de 1994 à 2016. Depuis 2016, il a rejoint Sciences Po comme professeur de sociologie et il y dirige le Médialab. Dominique Cardon se consacre, depuis 1998 aux divers aspects de l'espace public numérique : il a ainsi conduit ou dirigé des recherches sur l'histoire d'Internet, les médias alternatifs, les usages militants du réseau et les formes d'expression politique sur le Web. Ses recherches récentes portent sur les réseaux sociaux de l'Internet et sur l'analyse des formes de coopération et de gouvernance dans les grands collectifs en ligne. Il conduit également une analyse sociologique des algorithmes organisant l'information sur le Web. Les travaux de Dominique Cardon ont été publiés dans la revue Réseaux et ont fait l'objet de divers ouvrages publiés au Seuil (Collection La République des idées), aux éditions de Sciences Po ou de l'INA. Il est membre du Comité prospective de la CNIL.

Les échos de l'enseignement supérieur

➤ La gestion de la loi de programmation



La loi de programmation finira bien par entrer dans le champ du débat public et de la discussion politique au parlement, bien que le gouvernement ait actuellement des préoccupations plus prégnantes, notamment au plan budgétaire et sanitaire...

Plusieurs points relatifs à la recherche publique ou privée viennent enrichir un panorama déjà complexe, tel le plan sur les technologies quantiques ou les investissements à décider pour stimuler les énergies renouvelables ou pour poursuivre la recherche dans le nucléaire.

Le chiffre magique de 3 % du PIB consacrés à la recherche revient souvent et on peut comprendre les hésitations du gouvernement à l'afficher, vu l'incapacité de ses prédécesseurs à y parvenir. Pourtant ses interlocuteurs habituels en la matière s'impatientent : les uns insistent sur la nécessité de maintenir un dispositif de type CIR (crédit impôt recherche), les autres voient dans un tel affichage la condition nécessaire pour pallier des problèmes d'emploi récurrents...

Les déclarations généralement apaisantes de la ministre ne calment pas les craintes, même si personne ne critique la revalorisation des débuts de carrière à deux fois le SMIC ; le discours du président du CNRS, évoquant un darwinisme social pour la gestion des carrières, a créé quelques remous et renforcé la revendication d'un financement pérenne des équipes et laboratoires, ne serait-ce que pour alléger la chronophage course aux contrats. Les féministes ne manquent pas de rappeler les inégalités de genre qui persistent dans l'enseignement supérieur et la recherche.

➤ Chercheurs et universitaires pétitionnent

Le droit de pétition, formalisé ou non, existe depuis longtemps, y compris dans notre Constitution même s'il n'a jamais été effectivement mis en œuvre. C'est un mode d'expression fort usité dans les milieux intellectuels, pour faire entendre un point de vue original, souvent critique, voire contestataire. Son utilisation présente de multiples facettes, ainsi qu'en témoigne "Le Monde" du vendredi 21 février, dont la page 22 affiche deux suppliques fort différentes :

- la première a fait l'objet de fort nombreux commentaires dans les médias audiovisuels. Mille scientifiques, inquiets des évolutions climatiques, en appellent à la désobéissance civile, ce qui est exceptionnel dans un pays aux traditions fort éloignées des idées de Gandhi, Mandela ou Luther King...

- la seconde est une lettre au ton mesuré, adressée au président de la République et signée par la quasi-totalité des prix Nobel, médailles Fields et médailles d'or du CNRS de notre pays ; cette lettre réclame, avec la fermeté et la politesse qui conviennent, la mise au point d'un plan de financement pluriannuel de la recherche... On peut retrouver cette missive sur le site www.lemonde.fr et aussi méditer sur le rôle des médias à l'ère du numérique, comme y invite l'entretien avec Dominique Cardon dans ce numéro.



Deux projets ambitieux en région Île de France

Un laboratoire commun en intelligence artificielle (IA)



En juillet 2019, huit grands industriels français ont annoncé, dans un « Manifeste pour l'intelligence artificielle au service de l'industrie », leur intention d'atteindre rapidement une masse critique en IA sur les sujets de recherche prioritaires. Une première concrétisation de cette volonté s'est traduite par la signature d'un accord de partenariat, début février 2020, entre EDF, Thales et Total en vue de lancer un laboratoire commun de recherche en intelligence artificielle visant à développer des technologies adaptées aux besoins des systèmes critiques industriels. Celui-ci sera implanté dans les locaux d'EDF Lab Paris-Saclay (Palaiseau), ce qui permettra aux trois groupes, de renforcer leur coopération avec l'écosystème de Saclay.

Les axes développés en priorité dans cette unité à management collégial seront l'explicabilité (comprendre le processus amenant au résultat pour renforcer la confiance), l'apprentissage par renforcement et la simulation (optimiser le comportement d'un système face à un grand nombre de paramètres).

Un campus cybersécurité

À la suite de la demande explicite du président de la République d'examiner l'opportunité de créer un cybercampus à vocation européenne sur le territoire national, le Premier ministre a confié en juillet 2019 à **Michel Van den Bergh**, président d'Orange Cyberdéfense, le soin de préparer un mémorandum permettant de préfigurer ce projet. Cette initiative avait préalablement reçu le soutien actif des industriels Orange, Thales et Atos, épaulés par les services de l'Etat : ANSSI (Agence nationale de sécurité des systèmes et d'information), MESRI et DGA.

Le rapport de M. Van den Bergh, remis le 7 janvier ¹, propose d'implanter, dès 2021, un campus de 700 personnes sur 10 000 m² (extensible à 15 000 m² ultérieurement), sur un emplacement à définir en région parisienne (Paris intra-muros ou ceinture Ouest de la capitale) avec pour objectif de fédérer et de faire rayonner l'écosystème de la cybersécurité. Le campus aura vocation à devenir rapidement « un centre de gravité de la cybersécurité et de la confiance numérique en France et en Europe » et à constituer le point de rencontre d'acteurs cyber provenant de tous les horizons (groupes industriels, PME/PMI, startups, laboratoires publics, etc.). Après une période de lancement bénéficiant d'aides au montage de la part l'Etat et des collectivités territoriales concernées, le campus devra être auto-financé par ses membres et disposer d'une gouvernance agile. Par ailleurs des collectivités telles que la région Pays-de-Loire et la métropole de Lille, se sont déclarées prêtes à investir pour le développement de campus satellites en région.



Classement 2020 de Times Higher Education (THE) : une université française fait son entrée dans le top 50

Le classement de THE a toujours été sévère pour les universités françaises, trop petites et insuffisamment attractives sur le plan international. Celui de 2020 – qui vient d'être publié – ne fait pas exception, mais on note toutefois un léger mieux. Si comme chaque année les Etats-Unis et le Royaume-Uni trustent les places d'excellence (omniprésentes dans le top 20), on note avec satisfaction l'arrivée pour la première fois d'une université française, Paris Sciences Lettres (PSL) dans le top 50 mondial, passant de la 72^e à la 45^e place.

¹ Rapport téléchargeable sur https://www.economie.gouv.fr/files/files/PDF/2020/20200128_np_anssi_cybercampus_rapport_v3a.pdf

Cette université, de création récente, regroupe un certain nombre d'établissements particulièrement renommés dont Chimie ParisTech, l'ENS, ESPCI, Mines Telecom et l'Observatoire de Paris, pour ne citer que ses composantes scientifiques. Dans son sillage on note également que quatre autres universités françaises ont intégré le top 200. Dans les 100 meilleures, mentionnons Sorbonne Université, fusion de l'ancienne université Pierre et Marie Curie et de Paris Sorbonne, qui se classe 80^e, et l'Ecole polytechnique qui intègre le top 100 à la 93^e place, progressant ainsi de 15 places. Les deux autres universités du top 200 sont Paris Diderot et Telecom Paris, respectivement 130^e et 188^e. Il faut peut-être voir dans l'amélioration significative de certains de ces classements, une résultante de l'effort de regroupement d'universités entrepris pendant le quinquennat précédent, sous l'impulsion de l'ancien secrétaire d'Etat, Thierry Mandon.

Colloques sur l'enseignement supérieur

Il semble désormais habituel aux institutions concernées de débattre annuellement de grandes questions relatives à la pédagogie ou aux enjeux sociétaux ; à en juger par les millésimes de ces colloques, il s'agit d'un phénomène assez récent, dont l'abondance même interroge. On a ainsi relevé successivement :

- les **4^e Journées nationales de l'Innovation pédagogique dans l'enseignement supérieur (JIPES)** organisées par le ministère les 23 et 24 janvier sur L'approche par compétences, un levier pour la transformation pédagogique ;



- le 12^e colloque annuel de la CTI qui a réuni près de 500 personnes à Bordeaux et était centré sur l'alignement pédagogique, concept pédagogique récent (introduit en 1996

par John Biggs) qui a trait à la cohérence entre les objectifs d'apprentissage, les activités pédagogiques et les stratégies d'évaluation ;

- la 7^e édition des Journées nationales de l'ingénieur (JNI) des ingénieurs et scientifiques de France (IESF), sur le thème Agir pour le développement humain, qui ont rassemblé, entre le 2 et le 15 mars, largement plus de 10 000 personnes.

La Conférence des directeurs des écoles françaises d'ingénieurs (CDEFI) annonce son colloque pour juin 2020, sans en préciser le thème (en 2019, à Toulouse, il s'agissait d'éthique) Il convient également de mentionner le séminaire CVIEC (Contribution de vie étudiante et de campus) tenu en septembre 2019 et qui avait l'originalité de réunir tous les acteurs : CDEFI, CGE et Ministère, mais aussi la CPU et le CROUS.

Remise du rapport du collège d'experts sur le thème «Faire de la France une économie de rupture technologique»



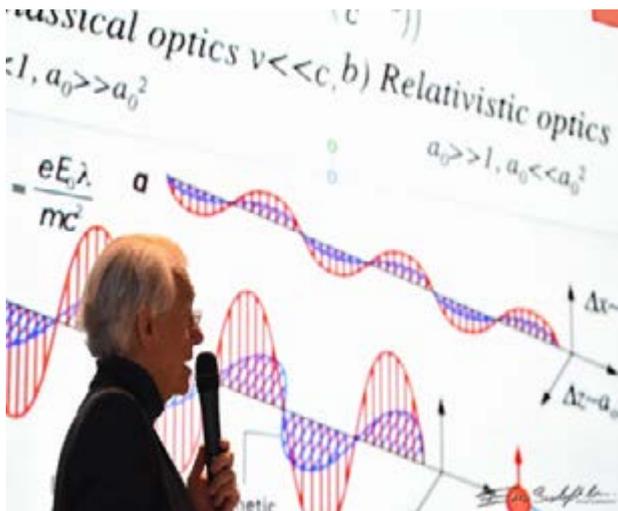
Le 7 février 2020, le ministre de l'Economie et des finances et la ministre de l'Enseignement supérieur, de la recherche et de l'innovation se sont vu remettre le rapport du collège d'experts présidé par Benoît Potier, PDG de l'Air Liquide, mandaté dans le cadre du pacte productif en vue d'identifier les marchés émergents sur lesquels la France devrait se positionner. Ce rapport liste 22 marchés sur lesquels les experts considèrent que la France a le potentiel pour jouer un rôle de leader. Dix marchés sont jugés particulièrement prioritaires, parmi lesquels on relève notamment :

- l'hydrogène pour les systèmes énergétiques ;
- la décarbonation de l'industrie ;
- la santé digitale ;
- les technologies quantiques ;
- la cybersécurité.

Compte-rendus

➤ Une journée à l'ENS Paris consacrée aux nouveaux lasers

Le 7 janvier 2020 s'est tenue à l'Ecole normale supérieure à Paris, la 3e Journée « Science et Progrès », organisée par la F2S (Fédération de sociétés scientifiques) qui associe les quatre sociétés savantes SEE, SFO, SFP et SFV. Après la conférence de 2018 consacrée à l'électronique du futur, celle-ci avait pour thème : **Les nouveaux lasers** : des microlasers aux lasers extrêmes, une occasion de célébrer le 60e anniversaire de l'invention du laser.



Devant un public d'une centaine de participants, cette journée, introduite par un exposé magistral sur la lumière extrême de Gérard Mourou, prix Nobel de physique 2018 (photo ci-contre), fut l'occasion de passer en revue les potentialités des dernières avancées en matière de lasers sur des thèmes aussi variés que le laser Mégajoule, les lasers microchips, les lasers pour la photonique quantique, l'environnement, les applications médicales, le patrimoine artistique ou le recuit laser de semiconducteurs, etc.

L'historique et les perspectives du laser ont été résumés et commentés en fin de journée au cours d'une table ronde qui a suscité nombre de questions de la part de l'auditoire. Pour terminer, Pierre Chavel, président du jury Edouard Branly, a révélé le nom du lauréat du prix 2019. Celui-ci, Guillaume Aoust, a décrit, lors d'une brève intervention, les travaux de photo acoustique appliquée à la détection des composantes d'un mélange gazeux lui ayant valu cette distinction. ■ **Alain Brenac**

➤ ERTS : Congrès européen sur les systèmes embarqués en temps réel - Toulouse, 29-31 janvier 2020

La dixième édition d'ERTS (Embedded Real Time Software), le congrès international des systèmes embarqués pour applications temps-réel critiques, s'est tenu à Toulouse au Centre Pierre Baudis. Au programme : le développement de systèmes de plus en plus complexes, plus connectés et évoluant vers toujours plus d'autonomie.



Organisé tous les deux ans par la SEE Midi-Pyrénées et la 3AF Midi Pyrénées (Association aéronautique et astronautique de France), le Congrès ERTS est un événement de référence pour les universités, les centres de recherche et l'industrie, dans le secteur des systèmes embarqués et des logiciels. Véritable lieu de rencontre entre professionnels et scientifiques, ERTS a vu converger les participants à ce 10ème Congrès des instituts de recherche, de l'aérospatiale, de l'automobile mais aussi du nucléaire et du ferroviaire. Cette année, l'accent fut mis sur la sécurité et l'ingénierie des systèmes, ainsi que sur les méthodes formelles, les plates-formes multi-cœurs et la certification.

Les thématiques proposées par les 60 membres du comité de programme ont concerné tous les domaines où les systèmes embarqués jouent un rôle central, notamment :

- les transports : aéronautique, automobile, ferroviaire, métro et maritime ;
- l'exploration par satellite et spatiale ;
- les e-soins de santé ;
- l'agriculture intelligente ;
- l'industrie et l'énergie de défense
- les Télécoms

Cette année, parmi les 105 papiers reçus en réponse à l'appel à communications, 56 contributions ont été sélectionnées et présentées oralement ainsi que 11 posters, le tout représentant plus de 300 chercheurs internationaux.

Ce congrès a été complété par une exposition spécialisée qui a permis à une sélection de prestataires d'outils, PME spécialisées dans le développement et l'intégration de systèmes embarqués,

de proposer des solutions dédiées aux besoins précis des visiteurs. L'exposition a été une occasion unique d'en apprendre davantage sur les derniers progrès et perspectives de ce secteur en constante évolution vers plus d'autonomie, de connectivité et d'intelligence artificielle.

ERTS 2020 a aussi abordé le thème des propriétés dites « non fonctionnelles » essentielles à la qualité des services fournis. Il s'agit d'améliorer la fiabilité et la résilience des systèmes grâce à des techniques permettant d'anticiper et/ou de détecter les conséquences d'éventuelles erreurs et modifications du système intégré afin de minimiser les risques de défaillance. L'autre défi consiste à garantir que le système traitera l'information strictement dans les délais impartis.

Cette année, l'événement a mis en évidence l'émergence de services pour systèmes embarqués à forte intensité logicielle et à capacités de communication croissantes. En effet, les technologies informatiques et numériques se déploient dans de nombreux domaines d'application générant une grande quantité de données à gérer (Internet des objets).

Enfin, la montée en puissance de l'IA et la généralisation de la connectivité se sont retrouvées naturellement au centre des tendances fortes du congrès.

Comme l'a conclu Jean Arlat, président du comité de programme : « Si les premières éditions d'ERTS étaient principalement dédiées à la sûreté de fonctionnement informatique, on constate une évolution autour du déploiement de systèmes de plus en plus autonomes et connectés ».

En résumé, cette 10^e édition d'ERTS a bien atteint son objectif d'événement phare des systèmes embarqués, soulignant avec précision les aspects essentiels à considérer quand on s'intéresse aux logiciels, qu'ils soient embarqués sur avions ou bien sur véhicules terrestres.

D'une manière générale, les participants ont reconnu l'intérêt des avancées technologiques présentées lors de cette édition et adhèrent sans réserve à la tenue du prochain congrès annoncé pour février 2022. ■ **Les organisateurs d'ERTS**

➤ Conférence du 22 janvier sur Ampère, LYON, ESME Sudria

A l'occasion de la rénovation de la place Ampère à Lyon, où siège la statue du savant depuis 1888 (photo 1), les commémorations du bicentenaire de la naissance, grâce à Ampère, de l'électrodynamique ont brillamment débuté par une soirée-conférence organisée conjointement par la SEE et la Société des amis d'André-Marie Ampère (SAAMA) à l'École ESME Sudria, dans le cadre des rendez-vous du maire du 2^e arrondissement de la Ville de Lyon.

Intitulée « *Ampère, ce savant lyonnais à l'origine de découvertes fondamentales* », la conférence donnée conjointement par Patrick Leclerc (SEE) et Georges Delorme (SAAMA) (ci-dessous) a



Photo 1 : Statue d'Ampère Place Ampère à Lyon



Photo 2 : Exposé de Georges Delorme

réuni près de cent personnes et a été suivie de la projection du documentaire « André-Marie Ampère » produit par France 3 Lyon en 1977. ■ **Patrick Leclerc**

➤ Conférence de l'Académie des sciences - 14 février 2020, Académie des sciences, belles lettres et arts de Lyon et Maison d'Ampère

Les célébrations du bicentenaire de la naissance de l'électrodynamique ont pris une tournure solennelle en ce mois de février. En effet, l'Académie des sciences a tenu une séance décentralisée à l'Académie des sciences, belles-lettres et arts de Lyon où son président Michel Lagarde a accueilli les très nombreux participants. Cette séance de conférences dédiées à Ampère constitue un événement majeur, comme cela a été souligné en introduction de la matinée du 14, par Etienne Ghys, secrétaire perpétuel de l'Académie des sciences : « *une première en trois cent vingt ans d'histoire !* ».

Le Comité national Ampère 2020 a profité de la présence à Lyon des membres qui assistaient à cette matinée pour organiser sa seconde réunion sous les lambris de la bibliothèque du Palais St Jean à l'invitation de l'Académie des sciences, belles-lettres et arts de Lyon. Le SERCE y a été accueilli comme nouveau membre. ■ **Jean-Paul Porret**

Manifestations scientifiques

prochainement organisées par la SEE ou en partenariat

➤ Soirée-débat SEE > Panorama des EnR : quelles technologies, quels potentiels ?

28 Avril 2020 à 17h30, Paris

La loi relative à la transition énergétique pour la croissance verte (LTECV) du 17 août 2015 fixe les objectifs de la politique de l'énergie, en cohérence avec les engagements européens et internationaux. La programmation pluriannuelle de l'énergie précise les objectifs à horizon 2023 et 2028.

En ce qui concerne les énergies renouvelables électriques, des objectifs ambitieux sont retenus pour les énergies éoliennes terrestres et maritimes, pour l'énergie solaire ainsi que pour la méthanisation. Ces objectifs conduisent à doubler les capacités actuelles, alors que la production de ces énergies renouvelables – hors hydraulique – couvre aujourd'hui environ 12 % de la consommation.

Ces énergies font désormais partie intégrante de nos vies et de nos paysages. Le club Stockage et nouveaux moyens de production propose un panorama de ces technologies et de leurs caractéristiques ainsi que leurs perspectives d'évolution. Comme à chaque soirée-débat du CT-SMP, l'événement se terminera par un cocktail convivial qui permettra de prolonger les discussions. ■

➤ 5^e Conférence francophone sur l'écoconception et le développement durable en génie électrique (CONFREG 2020)

Date : 1-3 juin 2020



L'écoconception est la prise en compte, dès la conception, de l'impact environnemental d'un dispositif tout au long de sa vie, « du berceau à la tombe ». L'objectif de cette manifestation est de faire le point sur la thématique de l'écoconception dans tous les domaines du génie électrique au sens large.

Cette conférence tournante entre France, Suisse et Canada, cofondée par la SEE, se tient cette année à Montréal ; très généraliste, elle abordera tous les aspects de l'écoconception : de la législation aux pratiques industrielles en passant par la recherche scientifique sans oublier l'impact économique. Elle traitera également la thématique du développement durable, notamment des apports du génie électrique dans la transition énergétique. Elle vise donc un public très large d'industriels, d'universitaires, de chercheurs et d'étudiants acteurs de l'écoconception et du développement durable ou sensibilisés à ces thématiques. ■

➤ Eco Race

15-16 mai 2020, Albi

Pendant deux jours, les 15 et 16 mai prochain, se déroulera la 4^e édition de l'Albi Eco Race. Cette compétition internationale réunit des équipages qui vont s'affronter sur le circuit d'Albi dans différentes catégories de véhicules électriques, hybrides, solaires et à hydrogène.

Cette année encore, la SEE sera partenaire de l'événement, avec une particularité toutefois, bicentenaire Ampère oblige, la compétition fera place à une conférence sur André-Marie Ampère, ses découvertes et leurs implications dans les nouvelles mobilités.

Un prix « Ampère » sera également remis à cette occasion. ■



Autres manifestations scientifiques signalées en 2020

Énergie

ICHEST 2020: International Conference on Hydrogen Energy Science and Technology

16-17 avril 2020, Lisbonne (Portugal)

<https://waset.org/hydrogen-energy-science-and-technology-conference-in-april-2020-in-lisbon>

FOWT 2020 Floating Offshore Wind Turbines

22 - 24 avril 2020, Marseille

Le plus grand événement mondial de l'éolien flottant en mer.

<http://www.fowt-conferences.com/fr>



EUROPEAN EV CHARGING SUMMIT

27-28 mai 2020, Rotterdam (Pays Bas)

<https://www.wplgroup.com/aci/event/evcharging-summit/>

EVER MONACO

28-30 mai 2020, Monaco

Un salon de rencontres internationales sur le thème des véhicules écologiques et des énergies renouvelables.

www.ever-monaco.com



EXPOBIOGAZ

3-4 juin 2020, Lille

Le salon national du gaz renouvelable, un rendez-vous de référence en France traitant l'ensemble des solutions pour la production et la valorisation du gaz renouvelable.

<https://www.expo-biogaz.com/fr>



INTERSOLAR

17-19 juin 2020, Munich

Le salon mondial de l'industrie solaire. L'exposition et la conférence de l'événement portent sur les domaines du photovoltaïque, des technologies thermiques solaires, des centrales solaires, ainsi que sur l'infrastructure de réseau et l'intégration des énergies renouvelables.

<https://www.intersolar.de/en/home>

WORLD NUCLEAR EXHIBITION 2020 (WNE)

23-25 juin 2020, Paris Nord – Villepinte

WNE est le salon mondial de l'industrie mondiale du cycle de vie du nucléaire civil.

<https://www.world-nuclear-exhibition.com/>

Technologies de l'information, Intelligence artificielle

PBWS

Paris Blockchain Week Summit

31 mars - 1er avril 2020, Paris

<http://pbwsummit.com>

AI Net CONFERENCE 2020

31 mars - 2 avril 2020, Paris

Meilleures pratiques dans les réseaux opérationnels.

<https://www.uppersideconferences.com/ainet/>

INFOSECURITY EUROPE (ISC'20)

2-4 juin, Londres

La plus importante manifestation européenne sur la cybersécurité en Europe.

Thématique 2020 : la résilience des équipements et des réseaux.

NETWORKING 2020 The International Federation for Information Processing (IFIP) Networking 2020 Conference

23-25 juin 2020 • Paris

<https://networking.ifip.org/2020/>



Mobilité & bâtiment

BIM WORLD

31 mars-1^{er} avril 2020, Paris, Porte de Versailles

Le salon annuel du numérique au service du bâtiment et des infrastructures.

<https://bim-w.com/>



ELECTRIC ROAD

2 avril 2020, Bordeaux

Forum d'envergure internationale qui réunit les experts et les acteurs clés de l'électromobilité.

<https://electric-road.com/>

VEHITS 2020 - 6th International Conference on Vehicle Technology and Intelligent Transport Systems

2-4 mai, Prague (République tchèque)

Main topics: Connected Vehicles, Data Analytics, Intelligent Transport Systems and Infrastructure, Intelligent Vehicle Technologies Smart Mobility and Sustainable Transport Services

<https://www.businesswire.com/news/home/20191004005227/en/VEHITS-2020-6th-International-Conference-Vehicle-Technology>

Technologies matérielles

NANOTECH FRANCE

23-25 juin 2020, Paris

<https://www.setcor.org/conferences/Nanotech-France-2020>



ECIO 2020 - European Conference on Integrated Optics 2020

23-25 juin 2020, Paris

Thèmes: waveguide technology and platforms, devices and materials, integrated circuits and applications of photonics integrated circuits (PICs).

<https://www.ecio-conference.org/>

ERRATUM

Dans le numéro 2019-5, un certain nombre d'erreurs se sont malencontreusement glissées dans les pages dédiées à la cérémonie des Grands prix SEE 2019 (p. 169 et suiv.). L'orthographe du nom de famille de M. Yannick Phulpin était erronée et sa photo inversée avec celle de M. Arnaud Renaud. De la même manière, l'orthographe du prénom de M. Nouredine Hadjsaid n'a pas été respectée.

TARIFS ANNONCEURS BRUT HT

La Revue de l'Electricité et de l'Electronique (REE) est une revue au service des ingénieurs, chercheurs, enseignants, décideurs techniques et économiques intéressés par les secteurs de l'électricité, de l'électronique, de l'information et de la communication. Connaître l'état de l'art des technologies dans ces domaines ainsi que leurs évolutions et leurs applications, permet au lecteur d'enrichir ses compétences et de rester en ligne avec l'actualité.

Paraissant cinq fois par an, la REE est diffusé en version papier et numérique et touche plus de 10 000 lecteurs dans les cercles académiques et industriels.

EMPLACEMENT	PRIX EN € HT	FORMAT PLEIN PAPIER
Pleine page intérieure	1 000	H 297 x L 210 mm
4 ^{ème} de couverture	2 500	H 297 x L 210 mm
2 ^{ème} de couverture	2 000	H 297 x L 210 mm
3 ^{ème} de couverture	1 500	H 297 x L 210 mm
Face Sommaire (colonne 1/2 page)	1 300	H 297 x L 105 mm

Tarifs dégressifs pour une commande de :

- 2 insertions : -5 %
- 3 insertions : -10%

Ces tarifs sont valables jusqu'à 31 décembre 2020.

Pour un traitement optimal de vos ordres de publicités, veuillez les adresser à :

pubree@see.asso.fr

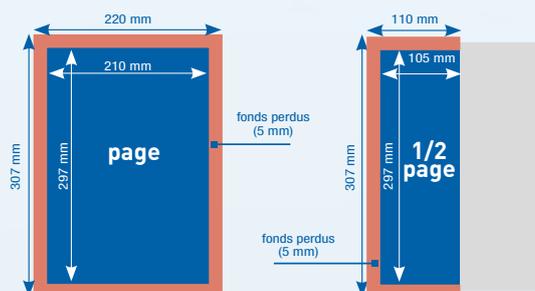
Les partenaires de la SEE profitent d'une offre spéciale, merci de contacter le responsable partenariats SEE.

Visuel :

Merci de nous fournir vos fichiers 2 semaines avant parution.

Images : .jpg, .tiff, .png, .pdf

Format : PDF haute définition 300 dpi + polices utilisées + 5 mm de fonds perdus/débords pour les pleines pages + traits de coupe.





Edition/Administration :

SEE - 17, rue de l'Amiral Hamelin - 75116 Paris

Tél. : 01 5690 3717

Site Web : www.see.asso.fr

Directeur de la publication :

François Gerin

Comité de rédaction : Bernard Ayrault, Alain Brenac, Patrice Collet, Suzanne Debaille, André Deschamps, Jean-Pierre Hauet, Jacques Horvilleur, Marc Leconte, Bruno Meyer, Gérald Sanchis

Secrétariat de rédaction :

Alain Brenac, Mélisande de Lassence - Tél. : 01 5690 3717

Partenariats Presse & Annonces :

Mélisande de Lassence - Tél. : 01 5690 3717

Publicité :

Mélisande de Lassence - pubree@see.asso.fr

Promotion et abonnement :

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

Mélisande de Lassence - Tél. : 01 5690 3717 - abo@see.asso.fr

Prix de l'abonnement 2019 :

France & UE : 125 € - Etranger (hors UE) : 132,43 €

Tarif spécial adhérent SEE : France & UE : 63 € - Etranger : 71,07 €

Vente au numéro : France & UE : 30 € - Etranger : 29,38 €

(hors livraison pour l'étranger)

Conception & réalisation graphique

Xavier Chambon - www.mediapict.com

Impression :

Jouve - 53100 Mayenne.

Siège social : 11 Bd de Sébastopol - 75027 Paris cedex 1

Tél. : 01 4476 5440

Origine du papier : Belgique - Taux de fibres recyclées : 0 -

Certification : PEFC - Ptot : 0,023

CPPAP : 1022 G 82069

Copyright : Toute reproduction ou représentation intégrale ou partielle, par quelque procédé que ce soit, des présentes pages publiées faite sans l'autorisation de l'éditeur, est illicite et constitue une contrefaçon. Toutefois les copies peuvent être utilisées après autorisation obtenue auprès du CFC - 20 rue des Grands Augustins, 75006 Paris (Tél. : 01 4404 4770) auquel la SEE a donné mandat pour la représenter auprès des utilisateurs (loi du 11 mars 1957, art. 40 & 41 et Code Pénal art. 425). La revue REE est lue par plus de 10 000 ingénieurs et cadres de l'industrie, dirigeants d'entreprises, directeurs des ressources humaines, formateurs...Profitez de ce lectorat ciblé et de qualité pour publier vos annonces.

Répertoire des annonceurs

Enquête REE	C2
Archive REE	C3
Appel Mécénat Ampère 2020	C4
Abonnement 3EI	p.8
Abonnement REE 2020	p.33
Bulletin Adhésion SEE	p.36
Affiche théâtre Ampère (Poleymieux)	p.106
Avantage SEE	p.130
Tarif publicité REE	p.143

Prochains Grands Dossiers

Dossier 1: Les systèmes électriques insulaires

Dossier 2: MATPOST 2019

Entre science et vie sociale,
les éléments du futur



La SEE, société savante française fondée en 1883, forte de 2 000 membres, couvre les secteurs de l'Électricité, de l'Électronique et des Technologies de l'Information et de la Communication. Elle a pour vocation de favoriser et de promouvoir le progrès dans les domaines : Énergie, Télécom, Signal, Composants, Automatique, Informatique.



La SEE fédère un vaste réseau d'experts universitaires et industriels en faveur des avancées scientifiques et technologiques

- 6 CLUBS TECHNIQUES
 - Ingénierie des Systèmes d'Information et de Communication
 - Cybersécurité et Réseaux intelligents
 - Radar, Sonar et Systèmes Radioélectriques
 - Stockage et nouveaux Moyens de Production
 - Systèmes Electriques
 - Ecoconception en Génie Electrique
- 6 GROUPES RÉGIONAUX
- 1 CERCLE DES ENTREPRISES
- 1 CERCLE HISTOIRE



La SEE contribue à l'organisation de conférences scientifiques en France en s'appuyant sur ses Clubs techniques et ses Groupes régionaux

- Conférences nationales et internationales
- Journées d'études thématiques
- Conférences-Débat
- Congrès internationaux, en partenariat ou non, avec d'autres sociétés scientifiques



La SEE favorise le partage du savoir, et contribue aux débats sur des problèmes de société en éditant des revues scientifiques et ouvrages thématiques

- Revue de l'Électricité et de l'Électronique (REE)
- Revue 3EI
- Publication électronique : SEE Actualités



La SEE récompense les contributeurs éminents au progrès des sciences et technologies dans ses domaines

- Grades Senior et Emérite SEE
- Prix : Brillouin-Glavieux, Général Ferrié, André Blanc-Lapierre, Thévenin
- Médailles : Ampère, Blondel

SOCIÉTÉ DE L'ÉLECTRICITÉ, DE L'ÉLECTRONIQUE ET DES TECHNOLOGIES DE L'INFORMATION ET DE LA COMMUNICATION



17, rue de l'Amiral Hamelin - 75116 Paris Tél. : 01 56 90 37 17 - www.see.asso.fr

AMPERE 2020

Le bicentenaire



Vous aussi, rejoignez la SEE et ses partenaires dans l'organisation des célébrations du bicentenaire !

Informations & partenariats : mecenes@ampere2020.fr

ILS NOUS SOUTIENNENT :

