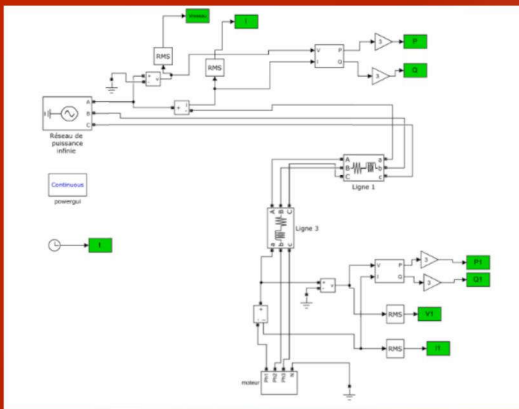
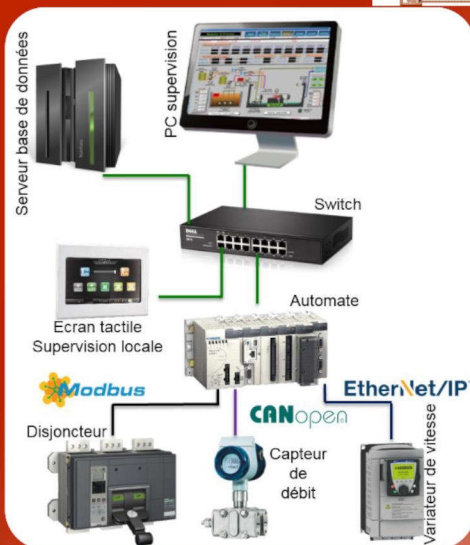
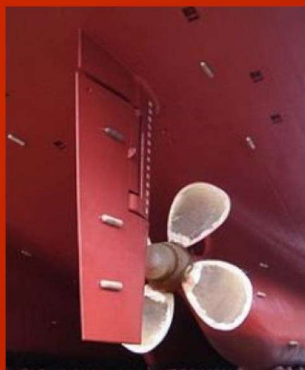
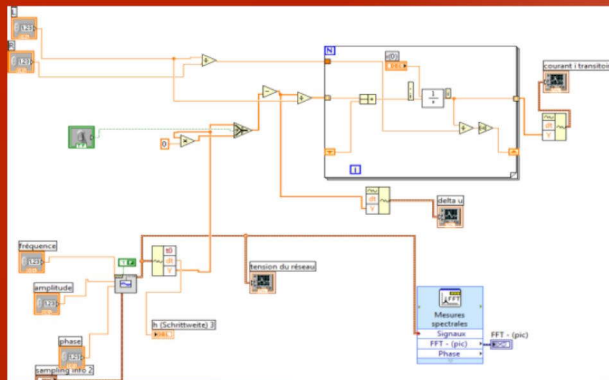
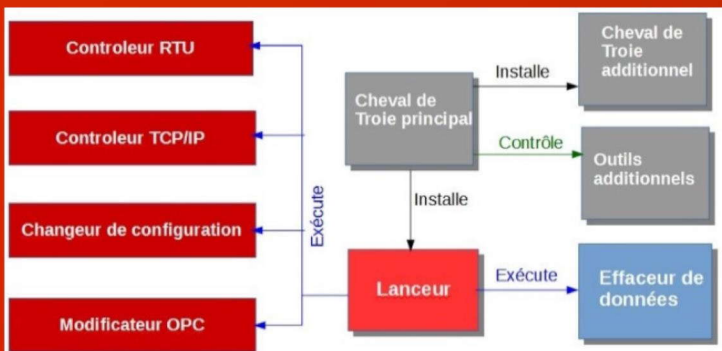




Ressource publiée sur Culture Sciences de l'Ingénieur : <https://eduscol.education.fr/sti/si-ens-paris-saclay>



Cyber-sécurité et réseau électrique (Partie 1)

Publication trimestrielle du Cercle Thématique 13.01 de la SEE

ENSEIGNER L'ÉLECTROTECHNIQUE ET L'ÉLECTRONIQUE INDUSTRIELLE



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



La Revue 3EI
publication trimestrielle
de la SEE

SOCIÉTÉ de l'ELECTRICITE, de l'ELECTRONIQUE et des TECHNOLOGIES de l'INFORMATION et de la COMMUNICATION.

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

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

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

<p>La Revue 3EI, Édition SEE, 17 rue de l'Amiral Hamelin 75783 PARIS Cedex 16</p> <p>Directeur de la publication François GERIN Président de la SEE</p> <p>Rédacteur en Chef Franck LE GALL</p> <p>Adresser les propositions d'article à : revue3ei@gmail.com ou sur le site https://www.see.asso.fr/3ei rubrique "soumettre un article"</p> <p>Communication Mlle Mélisande de LASSENCE Communication1@see.asso.fr 01 56 90 37 09</p> <p>Promotion et Abonnements (4 numéros par an) Janvier, Avril, Juillet, Octobre 2018. Tél : 01 56 90 37 09 abo@see.asso.fr</p> <p>tarifs TTC : (revue papier + num)</p> <p>Individuel : France et UE 42 € Pays hors UE 53 €</p> <p>Institutionnel : France et UE 60 € Pays hors UE 75 €</p> <p>Au numéro : France et UE 12 €</p> <p>Impression : JOUVE 53100 Mayenne 11 bd de Sébastopol - 75027 Paris Cédex 1 - Tel : 01 44 76 54 40 Couv. : O.P. : All. - TFR : 0 - C. : PEFC Corp. : O.P. : Esp. - TFR : 0 - C. : PEFC</p> <p>Dépôt Légal : Avril 2018 Commission Paritaire 1222 G 78028 ISSN 1252-770X</p>	<p style="text-align: right;">Sommaire du n° 93</p> <p style="text-align: center;">Thème : Cyber-sécurité et réseau électrique (Partie 1)</p> <p>p. 2 Éditorial,</p> <p>p. 3 La sécurité informatique des structures ICS/SCADA É. GUITTARD Lycée Léonard de Vinci, Saint-Germain en Laye</p> <p>p. 9 Cybersécurité des systèmes informatiques industriels A. JUTON IUT de Cachan</p> <p>p. 19 Réseau électrique industriel à échelle réduite : Application pédagogique A. LABONNE, E. RULLIERE, B. PASCUINELLI DE MORAIS, T. BRACONNIER Université de Grenoble, Laboratoire INP/G2Elab/ENSE3 GRENOBLE</p> <p style="text-align: right;">Hors Thème :</p> <p>p. 31 Commande en temps réel d'un onduleur monophasé connecté à un réseau sous Labview L. BENBAOUCHE¹, F. KRIM², R. GOMA³ ¹ Laboratoire d'électricité ESTP, CACHAN ² Laboratoire d'électronique e puissance, SETIF ³ Université Paris 13, Laboratoire L2ASD, VILLETANEUSE</p> <p>p. 38 Fiabilité d'éléments d'accumulateurs Lithium 18650 (mise en étude) A. SIVERT, B. VACOSSIN, F. BETIN U.P.J.V Université de Picardie Jules Verne SOISSON</p> <p>p. 47 C'est quoi, un courant électrique ? JL. IZBICKI^{1,2}, G. ZISSIS¹ ¹ Université Toulouse III Paul Sabatier, Laboratoire LAPLACE, TOULOUSE ² Université Lyon II, Laboratoire LARHRA, LYON</p> <p>p. 60 Genèse de la pile Volta et les courants galvaniques Seconde partie : la corrosion galvanique J.-J. ILARY Professeur de Physique/Chimie à la retraite LGT de MIREPOIX</p> <p>p. 66 Soirée débat : L'hydrogène, vecteur énergétique du futur SEE, Club technique « Systèmes Electriques » et « Stockage et nouveaux Moyens de Production » & Bureau français de l'IEEE PES</p>
--	--

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

Nous bénéficions tous à divers degrés des progrès offerts par l'avènement du tout numérique dans nos sociétés modernes. Toutefois, en tant que scientifiques et/ou technologues, nous sommes bien conscients que cette révolution comporte des aspects beaucoup plus inquiétants. On se rappellera qu'en 2010 le virus « Stuxnet » permettait de ralentir le programme nucléaire iranien de six mois à un an en perturbant le fonctionnement des centrifugeuses servant à l'enrichissement de l'uranium. La question de la sécurité de nos réseaux électriques et industriels se pose ainsi avec une acuité croissante.

Pour traiter convenablement de ce thème dont la richesse et l'importance actuelle sautent aux yeux, nous vous proposons de le traiter en deux étapes. La première partie introductive traitée dans ce numéro de juillet sera prolongée par une autre série d'articles qui publiés en janvier 2019.

Le thème s'ouvre sur l'article de M. E. Guittard sur « La sécurité informatique des structures ICS/SCADA ». Il nous dresse un panorama des menaces sur la sécurité informatique des réseaux industriels. Il décrit aussi comment différentes institutions internationales tentent de lutter pour contrer ces événements graves et inquiétants.

M. A. Juton de l'IUT de Cachan, poursuit l'analyse de M. Guittard afin d'aborder la démarche proposée par l'ANSSI pour sécuriser un site. Il souligne les bonnes pratiques qui devraient être appliquées et termine par une étude de cas d'usine pharmaceutique, support de la mise en pratique en TP à l'IUT.

Cette première partie du thème sur la cybersécurité s'achève avec l'article de l'équipe de M. A. Labonne de l'INP Grenoble. Ils nous présentent une application pédagogique sur un « Réseau électrique à échelle réduite ». Bien que le texte ne traite pas spécifiquement de la cybersécurité, il sera sûrement très inspirant pour les équipes qui souhaitent mettre en place des formations sur la cybersécurité des réseaux supervisés par un système SCADA.

L'article de M. L. Benbaouche de l'ESTP et de ses collaborateurs nous décrit la mise en œuvre de la commande en temps réel d'un onduleur monophasé connecté au réseau à l'aide du logiciel Labview. Très bon exemple d'une application pédagogique qui peut être traitée en projet par nos étudiants du supérieur.

Nous retrouvons ici l'équipe de M. A. Sivert qui nous présente une étude statistique sur la durée de vie de batteries lithium. L'objectif est qu'un étudiant de deuxième année de formation universitaire (en Institut Universitaire de Technologie, par exemple) puisse mettre en place une étude statistique de terrain, en entreprise, à partir d'un exemple concret et simplifié.

Les deux derniers articles de ce numéro s'intéressent à l'Histoire de l'électricité.

M. J.L. Izicki et M. G. Zisis s'appuient sur les textes originaux du XIX^e s., pour retracer les étapes de la compréhension du phénomène électrique. La lecture de cet article complétera les connaissances éparses que nous avons sur le sujet et qui sont enseignées du collège aux classes de CPGE.

M. J.J. Ilary nous propose quant à lui la seconde partie de son texte sur la « Genèse de la pile Volta et les courants galvaniques » qui se concentre sur « la corrosion galvanique ».

Bonne lecture

Le Comité de Publication de la Revue 3EI

*Faites connaître notre revue !
Vous en assurez ainsi la pérennité*

La Revue 3EI**Comité de publication**

Morgan ALMANZA

Hamid BEN AHMED

Arnaud BRUGIER

Jacques COURAULT

Jean FAUCHER

Gilles FELD

Jean Michel GAY

Jean-Philippe ILARY

Chérif LAROUCI

Marie-Michèle LE BIHAN

Franck LE GALL

Denis LABROUSSE

Pascal LOOS

Marc PETIT

Sylvain PIETRANICO

Oviglio SALA

Jean-François SERGENT

Jean-Claude VANNIER

La sécurité informatique des structures ICS/SCADA

Éric GUITTARD

Professeur de SII

LGT Léonard de VINCI – 2 Boulevard Hector Berlioz, 78100 Saint-Germain-en-Laye

Résumé : la sécurité informatique n'a pas été pensée dès la création des réseaux industriels et cela pose de plus en plus de problèmes au fur et à mesure que l'industrie confie à l'informatique toute sa gestion. Des événements graves et inquiétants font bouger les mentalités et on investit de plus en plus de temps et d'argent dans les protections mais est-ce suffisant ?

1. Le point de départ

L'industrie, anciennement basée sur des technologies électromécaniques de type boutons, relais et câblage logique a vu sa composition évoluer en intégrant de plus en plus de composants numériques programmables interconnectés entre eux sous forme de réseaux. Pendant longtemps, on a cherché à améliorer le fonctionnement de ces réseaux dans leurs fiabilités, leurs rapidités et leurs compatibilités pour permettre l'évolution d'un système de production.

On a de plus en plus intégré l'informatique au cœur de la gestion des systèmes pour obtenir les avantages d'une gestion centralisée permettant l'anticipation des pannes, le traçage, l'analyse pour des gains de productivité. On a assemblé plusieurs technologies de fabricants différents au fil des besoins profitant des protocoles de communication permis par les bus de terrain et réseau Ethernet.

Tout cela fait la force et l'adaptabilité des réseaux industriels actuels. Les industriels se sont aussi penchés sur la sécurité des biens et des personnes, développant des matériels dédiés performants. Un point néanmoins n'a pas été inclus dans le développement de ces technologies et c'est là que le bât blesse. La sécurité informatique n'a pas été prise en compte pour des réseaux souvent séparé d'Internet et donc potentiellement à l'abri de toute attaque. Mais tout ceci a été remis en cause suite à un acte de cyberguerre où un matériel sur un réseau pourtant isolé de l'extérieur a été victime d'une attaque d'une ampleur incroyable.

2. Les événements qui ont changé la vision des industriels

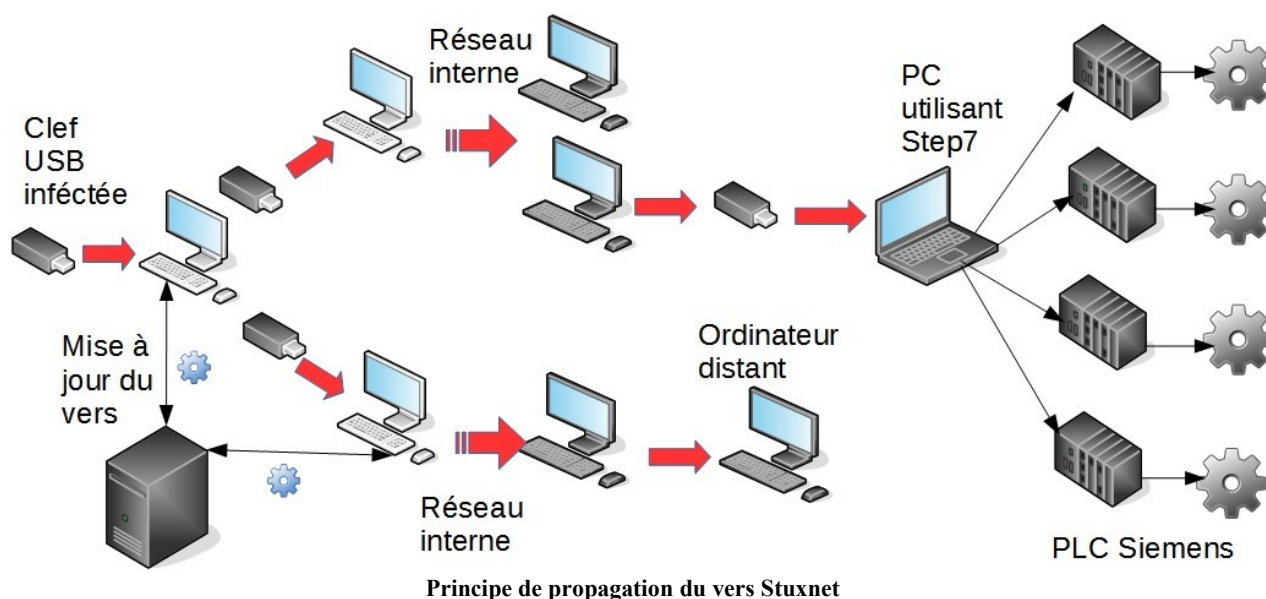
En 2010, un ver informatique (1), d'une portée et d'une complexité jamais vues jusqu'alors, fut trouvé par une société d'antivirus biélorusse du nom de VirusBlokAda. Ce malware informatique, nommé, par la suite, Stuxnet (2) par Siemens, n'était pas du tout comme les autres et n'avait pas le comportement d'un malware (3) commun qui visait habituellement tout porteur dans le but plus ou moins indirect de gagner de l'argent.

Ce ver, dont la propagation a commencé en 2009 dans sa version aboutie, s'est répandu plus particulièrement en Iran puis dans le monde entier, utilisant plusieurs médiums pour se répandre dont les réseaux Peer-to-peer et les clefs USB. Stuxnet avait la particularité de s'activer uniquement en présence d'une architecture de type SCADA spécifique et était totalement inoffensif pour les porteurs, utilisant si possible leur connexion internet pour se mettre à jour. Il avait aussi la particularité d'utiliser quatre vulnérabilités différentes que l'on appelle « zero day » (4) ainsi que quinze exploits différents pour atteindre sa cible. Les failles 0-day en question étaient totalement inédites et n'avaient jamais été exploitées, portant principalement sur l'élévation de privilège (5) sur un système Windows et la prise de contrôle de PLC Siemens infectant les projets développés à l'aide de Step7.

Le but de ce ver était de s'activer sur un ordinateur portable où Simatic WinCC V7 était installé pour ensuite modifier son comportement afin d'altérer le fonctionnement des contrôleurs reliés à celui-ci. C'est ainsi que ce ver a réussi à ralentir le programme nucléaire iranien de six mois à un an en perturbant le fonctionnement des centrifugeuses servant à l'enrichissement de l'uranium. Son action était simplement une modification de la vitesse des moteurs sur de courts intervalles. On estime à plusieurs millions d'euros les pertes engendrées par ce ver.

Il a été pratiquement démontré que ce malware fut développé par la NSA et l'unité 8200 israélienne dans le but de nuire aux développements nucléaires de l'Iran. Ce qui fait de cette attaque un acte de cyberguerre.

Stuxnet a mis à jour le grand problème de sécurité des réseaux industriels qui n'avaient jusque-là, jamais été visés par une attaque aussi significative. L'entreprise Siemens dû rapidement mettre au point des patches et des solutions pour éliminer ce malware qui utilisait plusieurs vulnérabilités de ses systèmes.



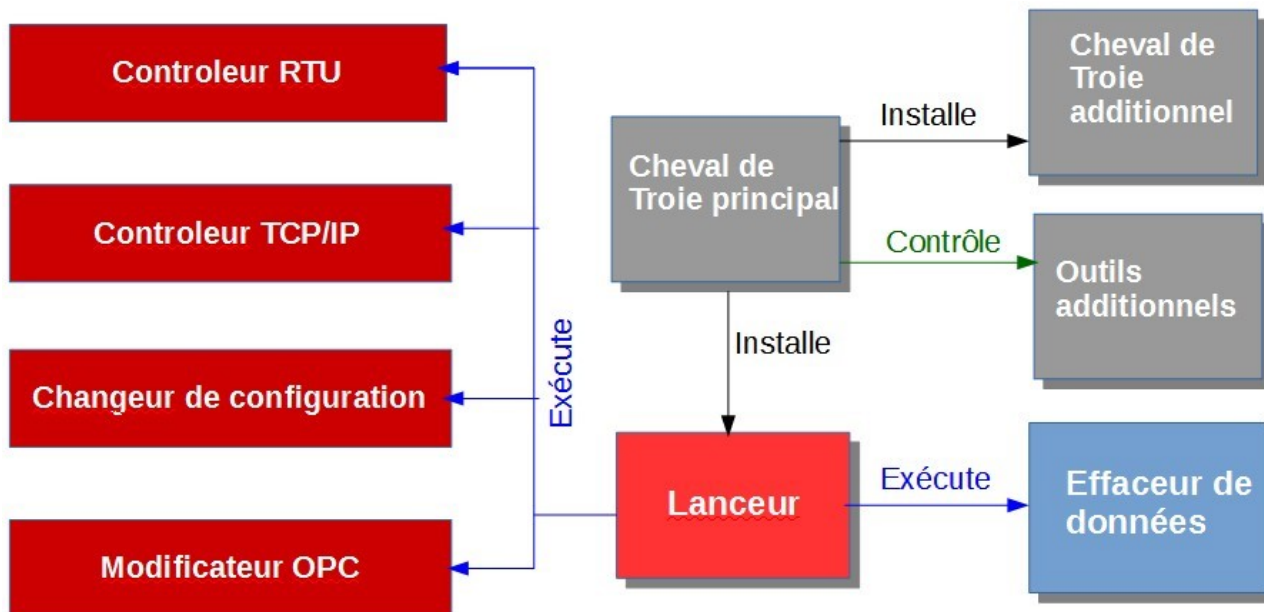
En 2013, un RAT (6) dénommé Havex (7) a été découvert. C'est un outil développé par le groupe d'origine russe DragonFly qui s'est spécialisé dans le secteur de l'énergie. On recense plus de 1000 entreprises de ce secteur touchées par ce malware. Ce RAT avait pour tâche de récupérer toutes les caractéristiques de son hôte, la base de données d'email et les mots de passe stockés afin de les envoyer à un serveur distant. Il utilisait le cheval de Troie Karagani ainsi que la backdoor (8) Oldrea. Il comportait aussi un module de scan OPC lui permettant de rechercher des équipements industriels de type ICS ou SCADA sur le réseau et de télécharger des exploits (9) pour étendre les capacités du cheval de Troie (10) et pour pouvoir ainsi contrôler l'environnement industriel de son hôte.

En décembre 2015, un réseau de fourniture d'électricité en Ukraine a été victime du malware Blacken (Black Energy 2) (11) provoquant pendant quelques heures une panne d'approvisionnement pour plus de 1,4 million d'habitants de la région d'Ivano-Frankivsk. Ce malware, qui est une mise à jour du cheval de Troie nommé Black Energy datant de 2007 et ne cessant d'évoluer depuis lors, a infecté les différentes entreprises du fournisseur lors d'une campagne de phishing à l'aide d'un document Word contenant une macro. La prise de contrôle des systèmes informatiques serait passée soit par des outils d'administration à distance au niveau du système d'exploitation, soit des logiciels clients de contrôle industriel à distance via des connexions VPN. Le but des attaques était de couper l'énergie électrique et surtout de compliquer la restauration des sites. Pour y arriver ce malware a agi sur la commande des coupe-circuits en leur imposant de rester ouverts et ce, dans une boucle de programmation infinie et a permis notamment aux acteurs de l'attaque d'éteindre les Alimentations Sans Interruption (ASI) via les interfaces de gestion des onduleurs. Et grâce à son homologue KillDisk qu'il embarque, les attaquants ont pu corrompre le Master Boot Record des ordinateurs

infectés ainsi que les firmwares des cartes Ethernet à la fin de l'attaque.

Lors des conférences Black Hat 2016 de Singapour, des chercheurs en sécurité informatique ont dévoilé un tout nouveau type de ver nommé PLC-Blaster (12). Ce malware analyse puis compromet les PLC Siemens Simatic S7-1200. Il a la possibilité d'infecter un automate et de causer des dysfonctionnements de production. Il est plus redoutable que Stuxnet car il a la possibilité de détecter tous les équipements vulnérables en utilisant le protocole TCP/IP et de se propager sans utiliser d'appareil externe comme un ordinateur. Il est très difficile à détecter puisqu'il n'existe pas de solution anti-virus pour les PLC. Il faut donc une expertise individuelle pour découvrir sa présence. Ce ver pose une nouvelle vision des risques informatiques. Depuis Stuxnet, les mesures pour se protéger des attaques extérieures se sont développées et renforcées au point de penser qu'on avait solutionné le problème. Mais imaginer qu'un ver puisse être distribué par un fournisseur apporte une nouvelle dimension à la sécurité informatique.

En décembre 2016, le réseau électrique ukrainien est une nouvelle fois attaqué. Cette fois-ci, c'est le malware Industroyer/CrashOverride (13) (14) (15) qui en est l'acteur. Il est une version évoluée d'Havex et de Black Energy, utilisant l'espionnage de sa cible et la mise à disposition des exploits permettant une attaque efficace pour ouvrir les organes de coupure de l'alimentation du fournisseur d'électricité. La modularité de cet outil d'attaque en fait une véritable menace pour tous les systèmes SCADA au vu de son aptitude à rester sur un ordinateur infecté. En effet, ce malware se comporte comme un service Windows, installe un autre cheval de Troie au cas où le premier serait détecté et efface toute trace de son action. Il possède un module permettant une attaque par déni de service contre des équipements Siemens de la gamme Siprotec qui sont des relais de protection utilisés dans les stations de distribution de l'électricité.

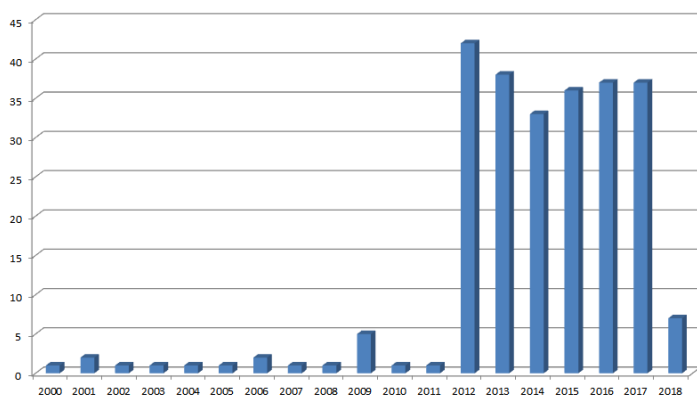


Principe de fonctionnement du malware Industroyer/CrashOverride

En 2017, le cryptovirus (16) WannaCry (17) (18) envoyé par e-mail à près de cinq millions de personnes a mis à mal entre autres l'entreprise Renault qui a dû mettre à l'arrêt plusieurs de ses sites pour limiter l'action de celui-ci. Cette attaque aurait pu être évitée avec une sensibilisation aux risques des macros dans les documents informatiques.

3. Les faiblesses des systèmes ICS/SCADA

Depuis 2010, plus de 230 CVE (19) ont été publiés concernant les failles propres aux productions Siemens qui sont le cœur de beaucoup d'attaques. Non pas du fait de la mauvaise gestion de la sécurité de ce groupe, mais plutôt de la large utilisation de leurs produits dans le monde. Et plus un produit est répandu, plus il risque d'être la cible d'attaques

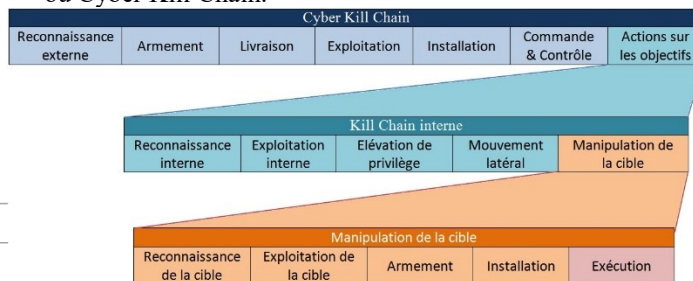


Evolution du nombre de CVE par année concernant Siemens selon le site <https://www.cvedetails.com>

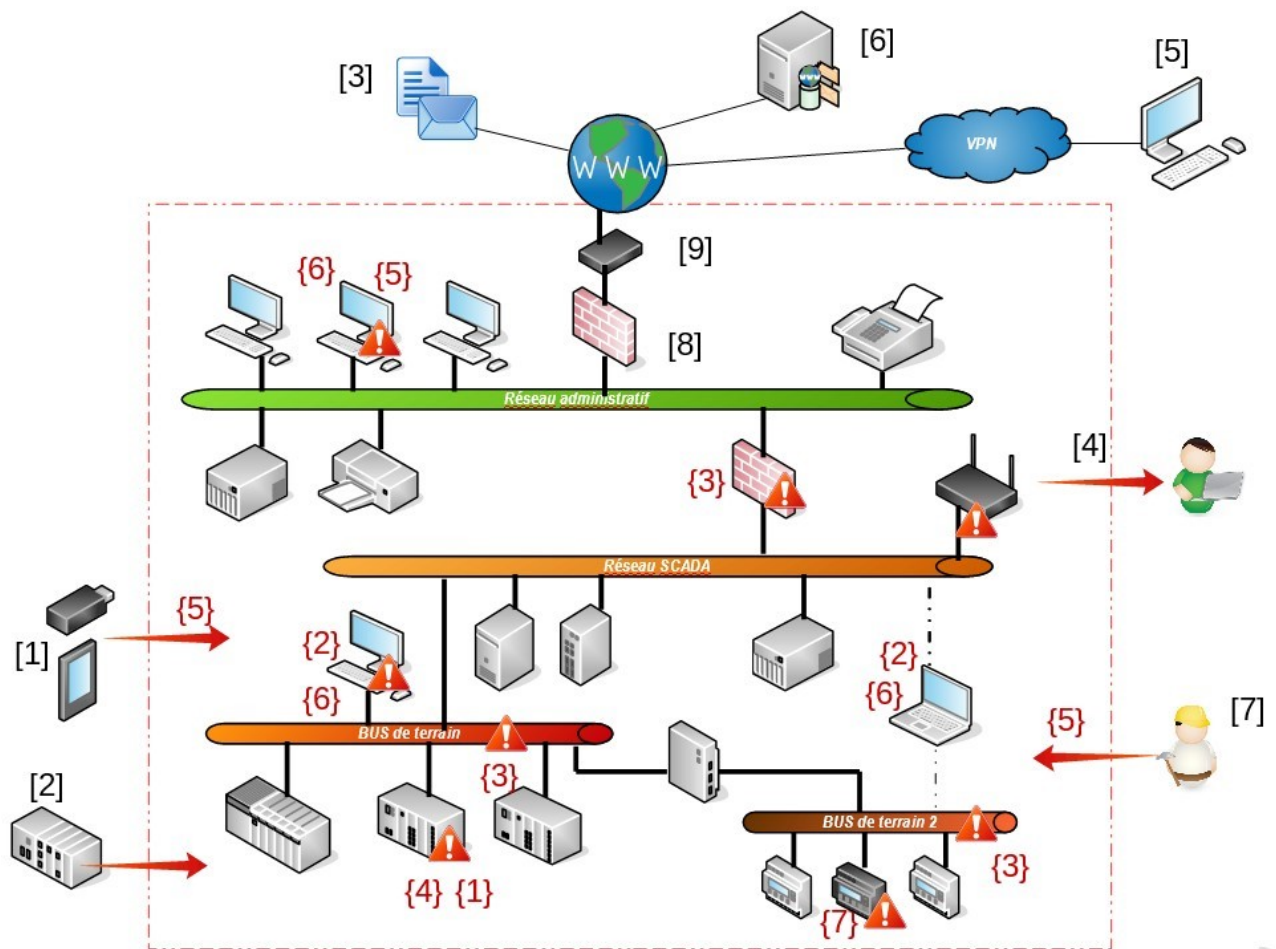
Ce graphique permet de se rendre compte de l'avant et l'après Stuxnet. Les recherches de vulnérabilités sont de plus en plus nombreuses et permettent de combler les faiblesses des systèmes SCADA. Celles-ci permettront au fil du temps d'avoir des systèmes plus robustes aux attaques sans ralentir le développement technologique.

Les vulnérabilités découvertes sont principalement des possibilités de Déni de Service (DoS), du gain d'informations et de l'exécution de codes arbitraires. Celles-ci sont très utiles pendant une attaque, permettant de se renseigner sur la cible, de la manipuler et de la mettre hors service pour paralyser un fonctionnement.

Les attaques sont de plus en plus perfectionnées et répondent à un modèle militaire décrit par Lockheed Martin (20) que l'on nomme la chaîne cybercriminelle ou Cyber Kill Chain.



Cette chaîne permet d'envisager toutes les étapes d'une possible attaque. Et l'on peut remarquer que les étapes de reconnaissance, de manipulation et d'exécution de la cible en font partie.



Plus globalement les failles des systèmes SCADA sont de deux natures principales :

- la pénétration du système,
- la prise de contrôle du système.

Une analyse permet d'identifier les vecteurs de pénétration des systèmes :

- [1] l'introduction d'appareil de stockage comme les clés USB, les smartphones (qui se retrouvent souvent branchés sur les ordinateurs sous prétexte de rechargement par des employés);
- [2] l'introduction de nouveaux matériels qui peuvent être infectés en amont de la livraison ;
- [3] les courriers électroniques contenant des pièces jointes ;
- [4] le réseau Wifi qui dépasse les murs de l'entreprise ;
- [5] les connexions à distance comme les VPN ;
- [6] les liaisons entre les logiciels tiers et leurs serveurs ;
- [7] les intervenants extérieurs qui peuvent se retrouver à introduire des clés USB et autres vecteurs d'infection ;
- [8] une mauvaise configuration de pare-feu ;
- [9] une mauvaise configuration des modems.

Les failles permettant la prise de contrôle :

- {1} des matériels comportant des failles de sécurité ;
- {2} les systèmes d'exploitation faillibles et obsolètes ;

- {3} l'absence de ségrégation des réseaux ;
- {4} l'absence de gestion des malwares sur tous les composants des systèmes SCADA ;
- {5} l'erreur humaine ou la non-formation aux risques ;
- {6} l'absence de mise à jour régulière ;
- {7} l'hétérogénéité des composants industriels ;
- des protocoles de communication qui ne prennent pas en compte la sécurité ;
- des mots de passe par défaut en dur et non chiffrés ;

Une meilleure connaissance de ces points faillibles ainsi que le modèle de Cyber Kill Chain peuvent permettre de mettre en place une stratégie de défense.

Les dernières menaces se sont introduites dans les entreprises à l'aide de courriers électroniques. Une formation des employés à ces risques aurait pu stopper les attaques à leurs débuts.

4. Quelques actions menées pour faire face à ces risques

Comme nous avons pu le constater, pour changer les choses, il faut communiquer, informer la majorité des utilisateurs des systèmes ICS/SCADA et former les collaborateurs aux risques. Pour qu'il y ait formation, il faut que les entreprises y voient un intérêt à investir du temps et de l'argent sur ce point. Nous allons voir

quelques exemples d'actions ou d'acteurs fournissant des ressources dans le sens de la communication.

Depuis quelques années, des associations inter-entreprises voient le jour dans le but de partager les informations sur la sécurité des systèmes d'informations. C'est le cas de l'association Clusif (21) qui, en 2017, a animé un groupe de travail afin de répertorier toutes les attaques connues des systèmes SCADA en élaborant 23 fiches incidents (22) pour proposer des pistes de bonnes pratiques à adopter dans le but de prévenir ces types d'attaques.

Le site de l'entreprise Sentryo (23) fournit des ressources et des guides pour mettre en place une stratégie de sécurité industrielle, ainsi qu'un système de supervision pour les systèmes ICS/SCADA permettant d'augmenter sa résilience en analysant tout ce qui circule.

Le site de la société XMCO (24) publie des magazines gratuits et de qualité sur l'actualité du monde de la sécurité informatique. XMCO met à disposition un CERT (Computer Emergency Response Team) pour accompagner les entreprises dans la cyber-surveillance.

L'ANSSI (l'Agence Nationale de la Sécurité des Systèmes d'Information) fournit des guides sur la cyber-sécurité des systèmes industriels pour accompagner les industriels dans leurs démarches de sécurisations informatiques (25).

Les recherches de failles de sécurité de la part de la communauté des experts en informatique et la publication de CVE font avancer les choses en limitant les failles encore non découvertes potentiellement les plus dévastatrices. Ce phénomène engendré par les hackers nous permet d'avoir un internet plus fiable et moins dangereux au fil du temps, de même que pour les réseaux industriels qui, eux aussi, vont bénéficier de cette expertise.

Du côté de la communication il existe diverses conférences autour de la sécurité informatique informant et sensibilisant les personnes aux risques possibles. Je me limiterai à citer par exemple "La Nuit du Hack", "Hack In Paris", la "Black Hat", la "Defcon" ou encore le "SSTIC".

Et le plus important est la prise en compte de ces risques par les fabricants des matériels industriels. Siemens, par exemple, a mis en place un CERT (26) orienté produits d'automatisation industrielle pour renforcer sa politique en matière de cybersécurité. Les autres entreprises ne restent pas non plus inactives dans ce domaine. Codesys ou ABB se sont mis aussi à publier des Advisories (alertes) concernant les mises à jour de sécurité à effectuer en fonction des failles découvertes. Schneider met à disposition sur son site la liste de notifications de sécurité (27) contenant les numéros des CVE associés.

5. Le futur

Au départ, nous travaillions dans un environnement non prévu aux risques apparus avec la mise en réseau des systèmes, dont on ne connaissait pas toutes les failles. A l'heure actuelle, nous avons appris de nos erreurs grâce ou à cause de ces failles, ce qui a permis une plus grande évolution dans la prise en compte de la sécurité. Mais lorsque l'on se rend compte qu'une simple campagne de phishing permet encore de mettre à genoux de gros acteurs de l'industrie et qu'il est encore possible de trouver via le moteur de recherche Shodan (28) des automates reliés à Internet sans véritables protections, il y a encore du travail concernant la sensibilisation des industriels.

Rien ne sensibilise autant un industriel qu'une attaque provoquant une perte d'argent. De cette manière, les malwares et attaques présentés ont eu un effet bénéfique pour l'ensemble des autres entreprises qui agissent dès lors pour éviter que cela ne leur arrive.

On peut espérer que les entreprises se mettront à cloisonner leurs réseaux pour éviter une pénétration trop facile et à investir dans des formations qui aideront leurs employés à se méfier de l'utilisation de clefs USB extérieures ou tout autre matériel brisant le cloisonnement.

Il se développe aussi de plus en plus de services de cyber-surveillance ou réponse à un incident informatique pour réagir au plus vite en cas de fonctionnement anormal. Le coût de ces services peut aussi encourager au développement de solution d'antivirus ou de nouveaux protocoles prenant en compte la sécurité.

Nous n'en sommes qu'au début et le cas d'école que fut la cyber-attaque de l'Estonie en 2007 démontre que la dépendance économique aux réseaux informatiques demande une vigilance accrue et qu'il faut mettre en œuvre les moyens nécessaires pour garantir l'efficacité à long terme des réseaux connectés.

6. Lexique

- (8) Backdoor : programme ouvrant une porte permettant l'accès depuis l'extérieur
- (10) Cheval de Troie : Programme ou logiciel légitime permettant le plus souvent la prise de contrôle à distance.
- (16) Cryptovirus : rançongiciel qui crypte les informations d'un système et qui demande une rançon pour pouvoir les décrypter.
- (19) CVE (Common Vulnerabilities and Exposures) : dictionnaire des informations publiques relatives aux vulnérabilités de sécurité publié une fois que celles-ci ont fait l'objet d'un correctif.

- (5) Élévation de privilège : mécanisme permettant d'obtenir des privilèges et pouvoirs plus élevés que nécessaire.
- (9) Exploit : programme permettant d'exploiter une vulnérabilité.
- ICS (Industrial Control System) : système de contrôle industriel.
- (3) Malware : un logiciel malveillant développé dans le but de nuire à un système informatique.
- (6) RAT (Remote Administration Tool) : un logiciel de prise de contrôle à distance.
- SCADA (Supervisory Control And Data Acquisition) : système d'acquisition et de contrôle de données.
- (1) Ver : programme se reproduisant en utilisant les canaux de communication tel que le réseau ou les clefs USB.
- (4) Zero day : c'est une vulnérabilité qui n'ayant pas fait l'objet d'un CVE.

7. Liens

- (2) https://www.symantec.com/content/en/us/enterprise/media/security_response/whitepapers/w32_stuxnet_dossier.pdf
- (7) <https://www.sans.org/reading-room/whitepapers/ICS/impact-dragonfly-malware-industrial-control-systems-36672>
- (11) https://www.sentinelone.com/wp-content/uploads/2017/06/BlackEnergy3_WP_01_2716_1c.pdf
- (12) <https://www.blackhat.com/docs/asia-16/materials/asia-16-Spenneberg-PLC-Blaster-A-Worm-Living-Solely-In-The-PLC-wp.pdf>
- (13) <https://dragos.com/blog/crashoverride/CrashOverride-01.pdf>
- (14) https://ics.sans.org/media/E-ISAC_SANS_Ukraine_DUC_5.pdf
- (15) https://www.welivesecurity.com/wp-content/uploads/2017/06/Win32_Industroyer.pdf
- (17) https://trapx.com/wp-content/uploads/2017/08/Research_Paper_TrapX_WannaCry.pdf
- (18) <http://cert-mu.govmu.org/English/Documents/White%20Papers/White%20Paper%20-%20The%20WannaCry%20Ransomware%20Attack.pdf>
- (20) <https://www.lockheedmartin.com/content/dam/lockheed-martin/rms/documents/cyber/LM-White-Paper-Intel-Driven-Defense.pdf>
- (21) <https://clusif.fr>
- (22) <https://clusif.fr/publications/fiches-incidents-cyber-industriels-2017/>
- (23) <https://www.sentryo.net>
- (24) <https://www.xmco.fr/actusecu/>
- (25) <https://www.ssi.gouv.fr/entreprise/guide/la-cybersecurite-des-systemes-industriels/>
- (26) <https://www.siemens.com/global/en/home/products/services/cert.html>
- (27) <https://www.schneider-electric.com/en/work/support/cybersecurity/security-notifications.jsp>
- (28) <https://www.shodan.io/search?query=schneider>
<https://scadahacker.com>

8. Bibliographie

- <https://www2.fireeye.com/rs/848-DID-242/images/ics-vulnerability-trend-report-final.pdf>
- https://www.ifri.org/sites/default/files/atoms/files/desarnaud_cybersecurite_2017_sl.pdf
- <https://clusif.fr/publications/scada-2017-securite-industriels-aujourd'hui-demain/>
- MISC n°74 : <https://connect.ed-diamond.com/MISC/MISC-074>
- https://customers.codesys.com/fileadmin/data/customer_s/security/CODESYS-Security-Whitepaper.pdf
- <https://repo.zenk-security.com/Techniques%20d.attaques%20%200.%20%20Failles/Securite%20des%20systemes%20de%20controle%20industriel.pdf>
- <http://www.isssource.com/wp-content/uploads/2012/12/120612Analysis-of-3S-CoDeSys-Security-Vulnerabilities-1.1.pdf>
- https://www.xmco.fr/actu-secu/XMCO-ActuSecu-35-Securite_Reseaux_Industriels.pdf

Cybersécurité des systèmes informatiques industriels

Anthony JUTON

Responsable pédagogique Licence Pro SARII - anthony.juton@u-psud.fr
IUT CACHAN

Résumé : Les risques liés à la cyber-sécurité pour les industries et les services sont réels comme le montre le blocage d'une usine Renault et d'hôpitaux anglais par le ransomware WannaCry en mai 2017. Consciente du risque cyber sur l'industrie, la loi de programmation militaire de 2013 impose un renforcement de leur sécurité informatique à des entreprises privées ou publiques considérées vitales pour la France, regroupées sous le terme Opérateurs d'Importance Vitale (OIV). On trouve notamment parmi les OIV des usines de traitement des eaux, des centrales de production d'énergie, des aéroports, des usines pharmaceutiques.

Ce renforcement concerne l'ensemble des équipements informatiques, ce qui comprend les systèmes gérés habituellement par les services informatiques (SI) normalement sensibilisés à la cyber-sécurité mais aussi ceux gérés par les services automatisation, beaucoup moins concernés jusqu'à présent par ces problématiques.

La sécurisation d'une installation industrielle est donc le fruit d'une collaboration entre informaticiens et automaticiens. Cela passe par une implication des informaticiens dans la production et par une formation des automaticiens aux bases de la cybersécurité.

Prenant acte de ce contexte, la licence professionnelle SARII (Systèmes Automatisés Réseaux et Informatique Industrielle) de l'IUT de Cachan a créé un module de cybersécurité des systèmes industriels pour compléter la formation en automatisation, réseaux et supervision de ses techniciens. Cet article repose essentiellement sur la démarche et les contenus de ce module prévu pour 4h de cours/TD et 12h de TP. L'ensemble s'appuie essentiellement sur les supports proposés par l'Agence Nationale de la Sécurité des Systèmes d'Information (ANSSI) et par le Club de la Sécurité de l'Information Français (CLUSIF) :

<https://www.ssi.gouv.fr/entreprise/bonnes-pratiques/systemes-industriels>

<https://clusif.fr/>

Dans un premier temps nous rappellerons le risque cyber pour l'industrie, nous aborderons ensuite la démarche proposée par l'ANSSI pour sécuriser un site. Nous analyserons rapidement quelques incidents récents pour souligner les bonnes pratiques qui auraient pu être appliquées pour les éviter et nous terminerons par une étude de cas d'usine pharmaceutique, support de la mise en pratique en TP à l'IUT.

1. L'industrie est soumise à un risque cyber

L'article précédent détaillant les risques de cyber-sécurité pour l'industrie, cet article ne rentrera pas dans le détail des attaques évoquées.

1.1. Les types d'attaque

Une attaque peut être ciblée contre l'entreprise (exemple de Stuxnet évoqué dans l'article précédent ou de BlackEnergy détaillé en partie 2) ou non (exemple de WannaCry qui attaquait tous les systèmes Windows XP ou 7 non mis à jour).

L'attaque nécessite une intrusion dans le système (ou dans beaucoup de systèmes extérieurs pour les attaques par déni de service) et un mécanisme de sabotage.

1.1.1. Solutions pour permettre l'intrusion dans le système

- Un spyware ou logiciel espion est un programme qui enregistre les frappes au clavier, webcam, microphone pour récupérer des informations (login et mot de passe notamment). Il peut s'installer lors d'une installation d'un logiciel depuis un site web

malveillant, par l'introduction d'un média amovible infecté ou lors de l'ouverture d'un document contenant des macros.

- Le phishing ou hameçonnage est un mail utilisant un aspect officiel pour demander la saisie de données personnelles. Plus il est personnalisé (logo de l'entreprise, utilisation de détails concernant la cible), plus il est efficace.
- Un ver est un programme qui se reproduit sur plusieurs ordinateurs en utilisant le réseau informatique.

1.1.2. Mécanisme permettant le sabotage ou la neutralisation du système industriel

- Un cheval de Troie est un programme qui permet de prendre la distance le contrôle de l'ordinateur cible. Si un PC de supervision ou de programmation des automates est infecté, le pirate peut modifier dangereusement le comportement du système,
 - Un ransomware ou cryptovirus est un programme qui chiffre les fichiers et qui demande un rançon pour les déchiffrer. Une fois les fichiers cryptés, le système est neutralisé,

- Un virus est un programme qui s'attache à un autre pour modifier son fonctionnement,
- Le déni de service est une attaque qui rend impossible l'utilisation d'un service, notamment via l'utilisation de botnet, réseaux de robots informatiques (souvent installés sur des systèmes informatiques peu protégés) qui vont ensemble saturer un serveur de requêtes.

1.2. Les opérateurs d'importance vitale

La loi de programmation militaire de 2013 définit 12 secteurs d'opérateurs vitaux pour l'intégrité du territoire de ses habitants ou son économie : alimentaire, télécoms, services publics, énergie, santé, espace et recherche, défense, transport, eau, industrie, justice et finance.

Dans ces secteurs, plus de 200 services publics ou entreprises privées dont les activités sont indispensables au bon fonctionnement et à la survie de la Nation sont classés opérateurs d'importance vitale (OIV). La liste est confidentielle, on y trouve des acteurs industriels dans le traitement de l'eau, la production d'électricité, la fabrication de médicaments, la gestion technique des aéroports... La loi impose à ces OIV le renforcement de la sécurité des systèmes d'information critiques qu'ils exploitent.

Les entreprises qui ne sont pas OIV sont également encouragées à prendre des mesures de cyber-sécurité, ne serait-ce que pour assurer leur survie économique en cas d'attaque.

1.3. Les spécificités des systèmes industriels

Les systèmes informatiques industriels sont très proches des systèmes informatiques de gestion (utilisation de réseaux Ethernet/TCP/IP, utilisation de PC et serveurs pour la supervision, utilisation de bases de données SQL...) mais ont des spécificités qui les rendent vulnérables et difficiles d'accès aux informaticiens :

- Certains systèmes informatiques industriels (centrales nucléaires, usines en 5/8, aéroports...) doivent être disponibles sans interruptions, rendant difficiles les mises à jour, les tests de vulnérabilité, etc...
- Certains systèmes informatiques industriels mettent en jeu la vie des personnes (centrales nucléaires, machines médicales, usines de production de médicaments...) et pour cela reçoivent des habilitations/qualifications qui ne sont plus valables en cas de mise à jour d'un équipement.
- Les équipements de contrôle-commande ont une durée de vie très longue (on trouve encore en fonctionnement dans les usines de très fiables automates Siemens S5 des années 80) et forment un parc souvent hétérogène (chaque machine peut avoir un modèle d'automate ou pire, une marque d'automate différentes). Cela rend le suivi des vulnérabilités et des mises à jour plus fastidieux. Ces automates sont souvent inconnus des informaticiens en charge de la cybersécurité.
- Les productions alimentaires et pharmaceutiques notamment doivent garantir la traçabilité de leur production. Cela rend nécessaire les

connexions entre les machines de terrain (automates, superviseurs) et les machines de l'administration (suivi de la qualité...)

- Les réseaux de terrain traditionnels (profibus, CANopen, DeviceNet, Modbus RTU...) ne sont pas sécurisés et pas sécurisables. Des protocoles TCP/IP largement utilisés en automatisme (Modbus TCP, BACnet/IP,...) ne sont pas sécurisés et pas sécurisables. Ces protocoles sont souvent inconnus des informaticiens en charge de la cybersécurité.

• La maîtrise exigée pour certaines tâches (régulation complexe de l'humidité dans des bâtiments d'architecture originale, mécanique de précision ou plomberie, intégration de robots industriels à des machines automatisées, partage d'un même réseau ethernet entre différents métiers dans le bâtiment...) demande l'intervention de sous-traitants spécialisés (mécanique, automatisme, robotique, supervision...). C'est particulièrement vrai dans le bâtiment où l'entreprise de construction fait appel à des entreprises différentes pour chaque lot technique (thermique, régulation, contrôle d'accès, supervision, plomberie/comptage, courant fort...). A cela s'ajoute la volonté de réduire la masse salariale des entreprises, pratique très présente dans l'automobile. Il est bien sûr plus difficile de maîtriser l'intégrité et la formation en cybersécurité des sous-traitants que celles de ses salariés.

1.4. Vulnérabilité des systèmes industriels

Pour souligner les vulnérabilités d'un système informatique industriel, nous prendrons trois cas représentatifs :

1.4.1. Système non connecté à Internet

Le système informatique industriel basique comprend typiquement un ou plusieurs automates supervisés par un PC de supervision via un réseau Ethernet, pas forcément connecté à Internet. Un serveur de base de données pour l'archivage peut aussi être présent localement. L'automate contrôle divers équipements via des bus de terrain standard ou basés sur Ethernet.

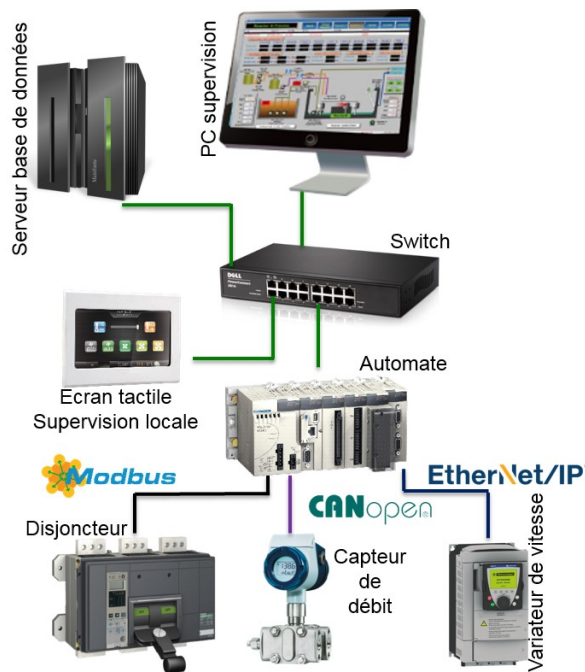


Illustration 1: Architecture type d'un système informatique industriel non connecté à Internet

Les problèmes peuvent subvenir de :

- la modification du programme automate via un accès direct à l'automate ou la modification des consignes de supervision par du personnel non autorisé (sous-traitant par exemple),
- l'introduction d'un virus par une clé USB,
- l'introduction d'un virus par un PC maintenance se connectant au réseau local,

Le virus peut alors simplement neutraliser le PC de supervision ou plus rarement (car beaucoup plus complexe) neutraliser un équipement industriel (automate ou variateur) ou plus complexe encore, modifier le programme automate ou les consignes envoyées par le PC de supervision.

1.4.2. Système connecté à Internet

Le réseau de l'atelier est connecté au réseau de l'administration via un routeur. Le réseau de l'administration est lui-même connecté à Internet via un routeur.

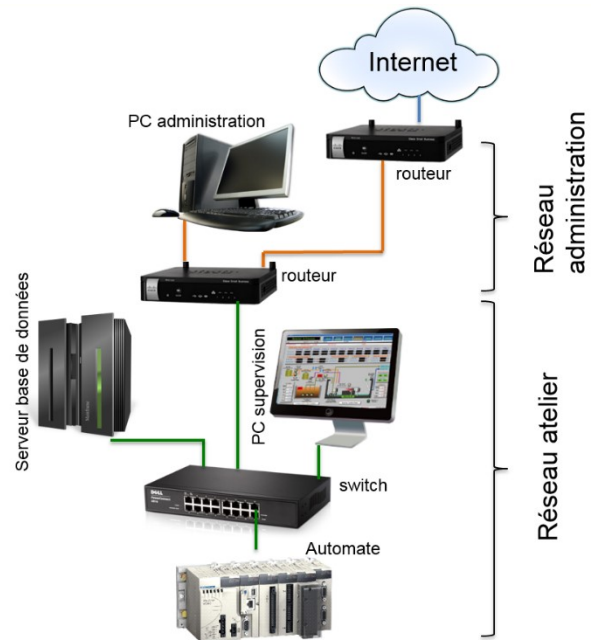


Illustration 2: Architecture type d'un système informatique industriel connecté à Internet

La connexion à Internet, outre une possibilité supplémentaire d'introduction de virus, amène le risque suivant : une personne malveillante peut s'introduire sur le réseau atelier via un accès ouvert (pour la télégestion par exemple) en dérobant des identifiant et mot de passe de connexion ou, plus complexe, via un cheval de Troie installé par un virus sur un PC de bureau par exemple. Elle peut alors neutraliser des équipements ou en prendre le contrôle.

Tout accès à distance à une installation fait courir le risque d'une prise de contrôle par une personne malveillante.

1.4.3. Système informatique industriel distribué

Un système distribué désigne un système dont les organes de contrôle-commande (automates, variateurs, modules d'entrées/sorties déportés) ne sont pas localisés dans le même local. Les grands sites de stockage d'hydrocarbure, les réseaux ferroviaires, les tunnels routiers et les bâtiments en général sont des systèmes distribués.

N'est représentée sur le schéma ci-dessous que la partie contrôle-commande. La supervision et la connexion éventuelle à Internet sont identiques aux architectures présentées ci-dessus.

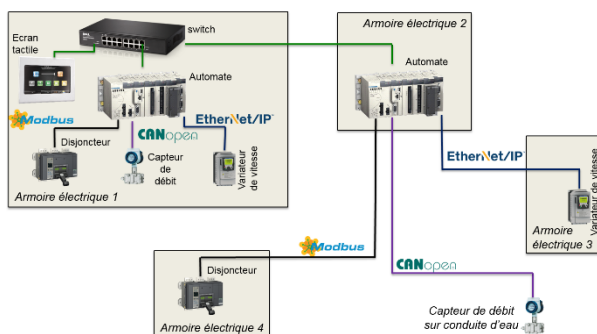


Illustration 3: Architecture type d'un système informatique industriel distribué (partie contrôle/commande uniquement)

Outre les risques précédemment cités, les réseaux de terrain standards, très répandus, très connus dans le monde industriels et très documentés, sur liaison RS485 (Modbus, Profibus, BACnet MSTP), sur bus CAN (CANopen, DeviceNet) ou spécifiques (LON, DALI, KNX...) ne sont pas sécurisés et pas sécurisables simplement (un standard sécurisé de KNX apparaît actuellement). Le passage de ces bus dans des zones publiques ou faciles d'accès fait courir le risque d'une intrusion sur le réseau et de l'envoi sur ce réseau d'informations de capteurs fausses ou de commandes d'actionneurs dangereuses.

Les réseaux de terrain modernes sur Ethernet (ProfiNet, EtherNet/IP, Ethercat) sont plus récents et leurs standards plus complexes tendent à prendre mieux en compte le risque cyber (authentification de la machine se connectant par exemple). Le protocole OPC-UA, sur Ethernet TCP/IP, utilisé pour la communication entre le superviseur et l'automate, ou entre automates, est même crypté, ce qui lui donne une popularité certaine actuellement.

1.5. Un exemple de cyberattaque : Stuxnet

Le cours présente alors l'attaque Stuxnet, détaillée dans l'article précédent.

2. Les mesures à appliquer

Une fois les risques présentés, le cours présente alors une version simplifiée de la méthode proposée par l'ANSSI pour la sécurisation des systèmes informatiques industriels. Cette méthode est détaillée sur le site de l'ANSSI, rubrique Bonnes Pratiques > Systèmes Industriels.

« L'objectif de la Sécurité des Systèmes Informatiques (SSI) est d'étudier les vulnérabilités des systèmes (matériel, logiciel, procédures, aspects humains) afin de déployer des mesures pour les limiter et permettre d'assurer la continuité des fonctions métier à un niveau acceptable. ». Il s'agit d'assurer la disponibilité, l'intégrité, la confidentialité et la traçabilité du système informatique industriel.

La cybersécurité doit être envisagée par les automatismes comme la sûreté de fonctionnement des machines :

- On identifie les risques puis la probabilité et les conséquences du risque,
- On met en place des mesures proportionnées au risque (coût et contraintes sur les utilisateurs), sous peine de les voir rejetées.
- On ne peut raisonner en termes de retour sur investissement.

La mise en place de la sécurisation du système informatique industriel doit impliquer les automatismes, bons connaisseurs de leurs équipements industriels et les responsables cybersécurité de l'informatique de gestion, formés en cybersécurité mais souvent hermétiques à l'automatisme.

La méthode suit 7 étapes, que nous détaillerons ensuite :

1. Sensibilisation des personnels
2. Cartographie des installations et analyse de risque
3. Prévention : concept de la défense en profondeur
4. Surveillance des installations et détection des incidents
5. Traitement des incidents, chaîne d'alerte
6. Veille sur les menaces et les vulnérabilités
7. Plans de reprise et de continuité d'activité

2.1. Sensibilisation des personnels

Une très large part des incidents est liée à l'imprudence des personnels de l'entreprise :

- Utilisation de clé USB,
- Logiciel « cheval de Troie » ou virus installés en ouvrant un fichier ou en installant un logiciel de provenances douteuses.
- Divulgarion de ses identifiant/mot de passe en réponse à un mail de phishing,
- Mot de passe écrit sur un post-it ou stocké en clair sur une machine,
- Identifiant/mot de passe identique pour tous les techniciens (y compris ceux qui quittent l'entreprise...),
- Machines non protégées ou avec les identifiant/mot de passe par défaut, avec des mises à jour logicielle non effectuées.

La sensibilisation de tous les personnels aux règles d'« hygiène informatique » contribue à réduire fortement les vulnérabilités et les opportunités d'attaques. La sensibilisation doit être régulière car les risques évoluent en permanence et les mauvaises pratiques reviennent.

2.2. Cartographie des installations et analyse de risque

Comme pour la sécurité des machines, la seconde étape est un audit de l'installation :

- Quels sont les objectifs métier (production, distribution, protection des biens et des personnes...) et les services assurés ?

- Quels sont les impacts en cas d'interruption de service ? En cas de modification du comportement du système ?

- Quelles sont les fonctions indispensables à l'atteinte des objectifs, et en particulier :

- leurs niveaux d'implication et de criticité dans la réalisation des services,
- systèmes qui les portent,
- si ces systèmes sont centralisés, distribués, accessibles à distance, etc. ;

Cela amène donc à un inventaire des installations matérielles (référence de l'équipement, version, protections, accès), de l'architecture réseau et des communications entre les équipements internes et externes. Cela amène également à séparer les équipements critiques devant être très protégés des autres.

L'ANSSI propose une méthode d'analyse du risque nommée EBIOS.

2.3. Prévention : concept de la défense en profondeur

On entre ici dans la partie technique de la cybersécurité : la défense en profondeur consiste à protéger les installations en les entourant de plusieurs barrières de protection autonomes et successives. Elles peuvent être technologiques ou liées à des procédures organisationnelles ou humaines.

Voici les protections à mettre en place :

- Protection physique : c'est la protection la plus simple, les équipements de contrôle-commande doivent être dans des armoires fermées à clé, le local de supervision doit n'être accessible qu'aux personnes autorisées. Siemens propose des verrous bloquant l'accès aux ports Ethernet des équipements (automates, switch...).

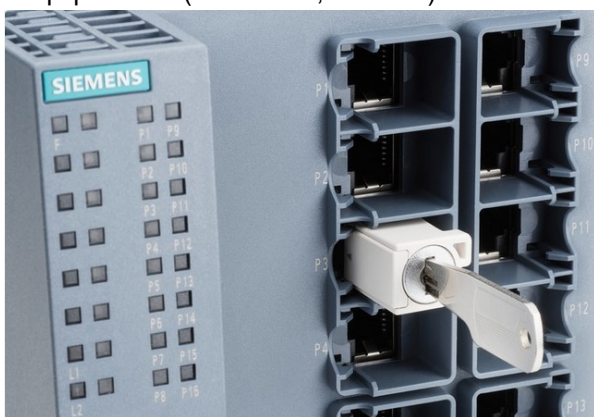


Illustration 4: Verrou Siemens pour prise RJ45 : IE RJ 45 Port Lock

- Pare-feu : sur les routeurs et sur les Pcs et automates, on bloque les ports UDP et/ou TCP non utilisés pour empêcher les requêtes indésirables d'arriver jusqu'à la machine.
- Cloisonnement des réseaux : Les VLANs et les pare-feux des routeurs permettent de filtrer les

échanges entre un sous-réseau et un autre. On veillera notamment à n'autoriser que les requêtes indispensables à entrer dans le sous-réseau atelier.

- Protection antivirale, les PCs (supervision, programmation) doivent avoir un antivirus à jour. Une procédure explicite de mise à jour des antivirus doit exister.
- Durcissement des configurations :

Pour un PC de supervision :

- Ne garder que les logiciels indispensables à la supervision (pas de logiciel de programmation des automates, pas de navigateur web, pas de logiciels de bureautique...),
- Bloquer les médias amovibles par ports usb,
- Supprimer ou désactiver les fonctions non utilisées mais activées par défaut,
- Mettre à jour le système d'exploitation et le logiciel de supervision,
- Distinguer clairement les profils (OS et supervision) utilisateur et administrateur. Le PC de supervision est sur un profil utilisateur (pas de droit pour installer des logiciels) et chacun dispose sur la supervision d'un profil adapté à ses besoins. Chaque personne a des identifiant/mot de passe uniques.
- Choisir un logiciel de supervision offrant les meilleures caractéristiques pour répondre aux exigences de sécurité et mettre en place ces fonctionnalités : mécanismes d'authentification, ségrégation des droits (la personne chargée de la maintenance peut acquitter les alarmes mais ne peut modifier les consignes du système par exemple).

Les logiciels de programmation des automates sont sur des PCs éteints et stockés sous clé,

Pour un automate :

- Changer les configurations par défaut (mot de passe par exemple),
- Mettre à jour le firmware de l'automate (disponible sur le site du fabricant),
- Supprimer ou désactiver les fonctions non utilisées mais activées par défaut (serveur web, utile pour la configuration mais pas pour l'utilisation, serveur FTP...).

Dans ce cadre de défense en profondeur, des procédures accompagnent ces défenses techniques, notamment concernant les interventions des sous-traitants qui doivent être planifiées précisément (mots de passe, accès, utilisation de ses propres outils ou non, échanges de matériels, qualifications...). L'ANSSI publie un guide de l'externalisation pour accompagner les entreprises dans la mise en place des procédures d'intervention des sous-traitants.

2.4. Surveillance des installations et détection des incidents

Les équipements réseaux proposent des journaux et pour les plus avancés des alarmes permettant d'indiquer un trafic anormal. Surveiller le réseau en lisant ces journaux système et en configurant ces alarmes mais

aussi en formant le personnel à détecter et signaler des comportements suspects de leur machine n'empêchera pas un incident mais permettra de le détecter au plus tôt et d'en limiter autant que possible les effets.

Plus un incident sera détecté tôt, plus il sera possible de mettre en place des mesures pour en réduire et confiner les effets comme par exemple :

- isoler physiquement les installations en cas d'attaque virale pour limiter les risques de propagation (on déconnecte du réseau les machines),
- arrêter une installation avant sa dégradation si des données de configuration ne sont plus intègres.

2.5. Traitement des incidents, chaîne d'alerte

Le dispositif de détection des incidents est associé à une organisation et des procédures pour traiter les incidents :

- que faire lors de la détection d'un incident ?
- qui alerter ?
- quelles sont les premières mesures à appliquer ?

La gestion des incidents doit également intégrer une phase d'analyse post incident qui permettra d'améliorer l'efficacité des mesures déployées initialement.

2.6. Veille sur les menaces et les vulnérabilités

La sécurité informatique est une action continue nécessitant des efforts permanents. La ou les personnes en charge de la cybersécurité du système industriel doivent mettre en place une organisation pour :

- Se tenir informé de l'évolution des menaces, des vulnérabilités, sur le site Internet de l'ANSSI ou sur celui des équipementiers qui doivent indiquer les vulnérabilités et les mises à jour disponibles.
- Mettre à jour régulièrement les micrologiciels (firmwares) des automates et autres équipements (variateurs, écrans tactiles...) et les systèmes d'exploitation et les applications sur les PCs de supervision et autres serveurs de bases de données.

L'entreprise doit donc accepter un coût et une période de maintenance pour ces mises à jour et les tests associés. La mise à jour doit parfois passer par la migration d'un OS non maintenu à sa version suivante. Précisément, Windows XP n'étant plus maintenu, il ne devrait plus être utilisé sur des systèmes industriels critiques. Wannacry a mis en évidence la vulnérabilité de Windows XP et le coût potentiel de sa conservation. (Le coût de Wannacry qui exploitait une faille connue de XP a été estimé entre 1 et 4 Milliards de dollars par différentes agences nationales de sécurité informatique).

Pour les systèmes qualifiés avec des versions d'un firmware et d'un système d'exploitation, il est nécessaire lors de la conception du projet, de prendre en compte la mise à jour des firmwares des automates et des logiciels de supervision et systèmes d'exploitation et d'intégrer des mécanismes de requalification des équipements si besoin.

2.7. Les plans de reprise et de continuité d'activité

L'objectif du plan de reprise est de se préparer à faire face à des événements exceptionnels pour lesquels toutes les mesures précédentes auraient échoué afin de minimiser les impacts et permettre de redémarrer l'activité le plus rapidement possible.

Il est important pour cela de disposer d'une sauvegarde de chaque automate, des équipements réseau et du PC de supervision, des codes sources et des données et de prévoir des modes de fonctionnement dégradé (le système continue la production, mais moins vite ou avec plus d'interventions manuelles). Les sauvegardes doivent être stockées sur des supports amovibles ou sur des machines éteintes ou déconnectées du réseau.

Pour des systèmes critiques, on prévoira un approvisionnement (automates, PC) pour limiter la durée de l'arrêt de la machine.

3. Analyse d'incidents

La méthode décrite, le cours reprend à partir des fiches du CLUSIF (Fiches Incidents Cyber SI Industriels sur <https://clusif.fr/>) 4 incidents de cybersécurité et invite les étudiants à chercher quelle vulnérabilité a été exploitée et quelle étape de la méthode aurait pu empêcher une telle attaque.

3.1. Attaque d'une station d'épuration des eaux

En 2015, l'attaquant a pris le contrôle de l'application de paiement en ligne (vulnérabilité du serveur SQL) d'une entreprise de traitement de l'eau afin de voler des données clients.

Le serveur exécutant cette application hébergeait les données de connexion d'un compte administrateur ainsi que l'adresse IP du serveur. L'attaquant a alors eu accès à l'interface de contrôle de l'installation.

En utilisant ces données l'attaquant a modifié les paramètres de l'application entraînant une perturbation dans le procédé de traitement des eaux.

Cette attaque révèle dans l'entreprise :

- Un système de paiement mal sécurisé,
- Un stockage des mots de passe sur un serveur accessible de l'extérieur,
 - Pas de cloisonnement entre le réseau « atelier » où se trouve l'interface de contrôle et le réseau « administration » où se trouve le système de paiement.

Le système de paiement (qui n'est pas du ressort de l'automatisme) hacké, une sensibilisation du personnel à la gestion des mots de passe et un cloisonnement des réseaux plus strict aurait permis d'éviter que l'attaque n'arrive jusqu'à l'atelier.

3.2. Empoisonnement de l'eau potable

En 2013, en Géorgie, aux USA, les attaquants se sont introduits dans la station en passant au-dessus des barbelés. Aucune effraction aux portes et aux fenêtres n'a été notée. Les attaquants ont eu accès au système de

supervision et ont modifié les réglages des taux de fluor et de chlore privant les clients d'eau potable.

Les véhicules des employés possèdent des GPS et attestent qu'aucun d'entre eux n'était près de la station durant l'incident.

Cette attaque révèle dans l'entreprise :

- Une mauvaise protection physique du site : passer sur les barbelés suffisait pour arriver jusqu'au superviseur ou alors un ancien salarié a gardé des accès,
- Une mauvaise protection du superviseur (PC allumé en permanence, pas de mot de passe ou identifiant/mot de passe d'un ancien salarié toujours valable).

Une protection physique renforcée du local de supervision et une gestion des identifiants/mot de passe du PC de supervision rigoureuse auraient permis d'éviter cette attaque.

3.3. Prise de contrôle du système de production d'une aciérie

En 2014, en Allemagne, les hackers se sont d'abord introduits sur le réseau bureautique du site industriel d'une aciérie par la technique du « spear phishing » (campagne de mails infectés personnalisés). Depuis ce premier réseau, ils ont pénétré les logiciels de gestion de production de l'aciérie, puis pris les commandes de la plupart des systèmes de contrôle de l'usine. Ils ont alors empêché un haut fourneau de se mettre en sécurité à temps et causé de gros dégâts à l'infrastructure.

Cette attaque révèle dans l'entreprise :

- Une réponse à un mail frauduleux par un salarié,
- Un mauvais cloisonnement permettant d'accéder au réseau « atelier » depuis le réseau « administration »,
- Une mauvaise protection d'un haut fourneau autorisant à outrepasser une protection thermique (problème de sécurité des machines).

Une meilleure formation des salariés et un meilleur cloisonnement des réseaux aurait permis d'éviter cette attaque. Cette attaque montre également le lien entre cybersécurité et sécurité des machines, politiques qui doivent être menées de front.

3.4. Coupure générale d'électricité - BlackEnergy

En 2015, une vague de « phishing » cible 3 compagnies de distribution d'électricité ukrainienne. Le mail comporte un fichier Word infecté qui, après ouverture et activation des macros, installe le malware BlackEnergy sur le poste.

Pour contourner le pare-feu séparant le réseau industriel du réseau de gestion, les attaquants, très compétents, piratent l'active directory (annuaire crypté des mots de passe de l'entreprise) et prennent le contrôle de comptes VPN permettant de commander à distance le superviseur.

Les attaquants reprogramment les onduleurs et corrompent le firmware des passerelles « série vers Ethernet » des postes électriques afin de perturber les opérations de remédiation.

Enfin, ils lancent l'attaque en désactivant les onduleurs et les sous stations électriques. Ils lancent également un déni de service téléphonique sur le call-center pour empêcher les usagers de déclarer les pannes.

80 000 foyers ukrainiens sont privés d'électricité pendant 3 à 6 h.

Cette attaque de haut niveau révèle dans l'entreprise :

- Des salariés ont ouvert un fichier Word contenant un virus,
- Un accès à distance à un système critique crée toujours une vulnérabilité, même si l'accès est crypté et demande une authentification,
- Les équipements industriels critiques (ici l'onduleur et les passerelles) doivent être protégés contre une reprogrammation à distance.

La sensibilisation des salariés est là encore un point essentiel de la cyber-sécurité. Il ne faut pas autoriser en action distante que ce qui est strictement nécessaire à la fonction de l'entreprise. Ici, restreindre la programmation des onduleurs et la mise à jour des passerelles à des interventions locales aurait permis de faciliter la reprise après l'attaque.

Ces 4 études de cas montrent qu'à chaque fois, ce sont 2 failles successives qui ont permis l'attaque. La mise en place de la méthode de sécurisation des installations, assez accessible, aurait permis de les éviter.

4. Etude de cas pratiques

Le cours de cybersécurité termine par une étude de cas fictive de sécurisation d'un site OIV associé à sa mise en œuvre en Travaux Pratiques sur 12h.

On considère une usine pharmaceutique française disposant d'un atelier de fabrication et d'un atelier d'emballage. L'usine produisant de l'insuline (nécessaire aux personnes diabétiques), elle est classée Opérateur d'Importance Vitale (OIV). De plus, la réglementation pharmaceutique exige une traçabilité importante de la qualité de la production. Le siège de l'entreprise situé au Danemark héberge la base de données comprenant les autorisations d'accès et doit pouvoir récupérer les données de production de l'usine française.

La supervision des deux ateliers a lieu dans un local de supervision placé dans l'atelier. La supervision, outre l'affichage des informations sur le système (mesures, alarmes) utilisées par les services maintenance et qualité, permet au chef d'atelier de passer certaines machines en mode manuel et de modifier les cadences, notamment pour adapter le débit de la production à celui de l'emballage.

Pour travailler en salle de TP, les IP publiques des routeurs site sont remplacées par des IP du sous-

réseau 192.168.2.0, réseau « public » de la salle de TPs de réseau. Une connexion sécurisée VPN relie le site Danois et le site Français.

L'installation est donc la suivante lors de l'arrivée des étudiants « sur site » :

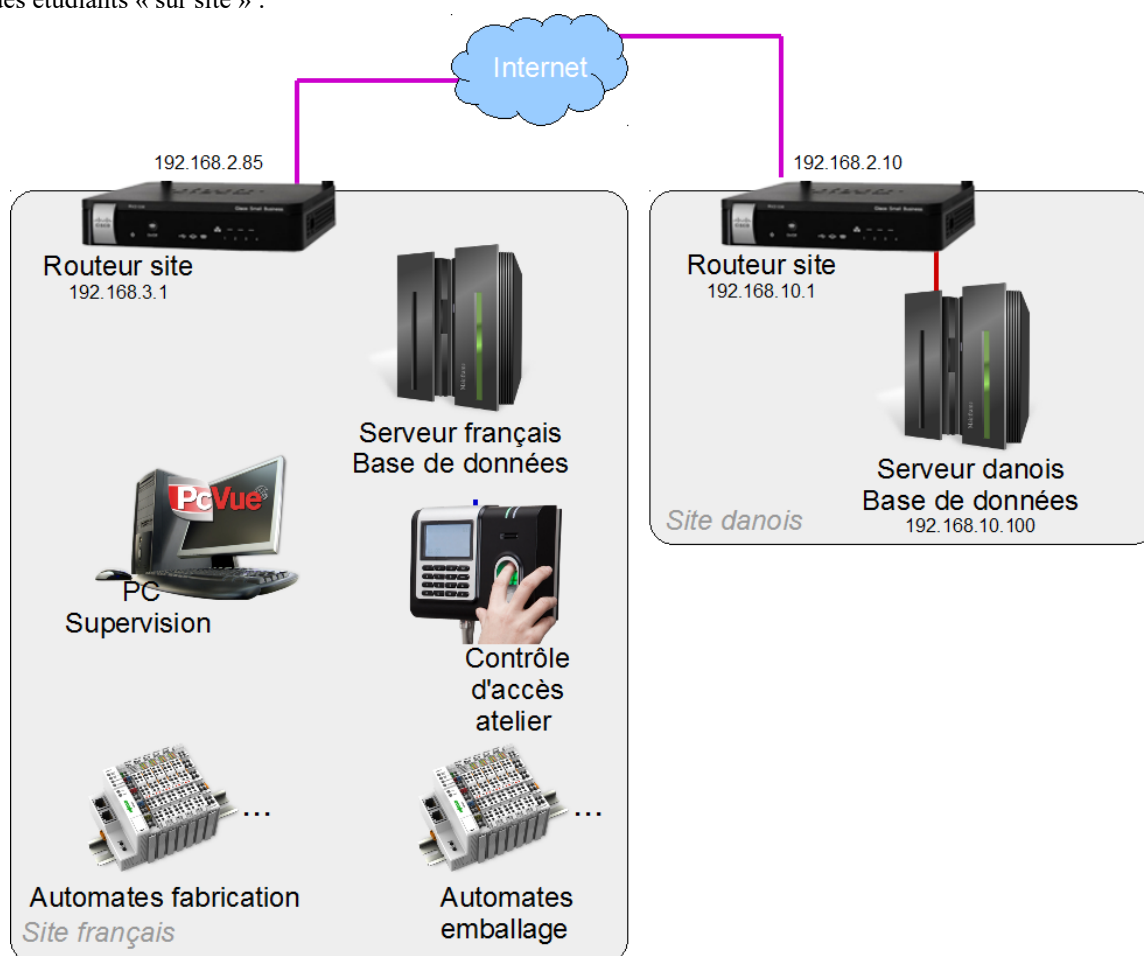


Illustration 5: Equipements de l'entreprise de production avant sécurisation du site

Les étudiants mettent en place la connexion sécurisée VPN site-à-site entre les 2 routeurs (Cisco RV215W).

Les étudiants mettent en place une supervision simplifiée : une entrée Tout ou Rien de l'automate de fabrication en modbus TCP remonte à la supervision et celle-ci contrôle une sortie Tout ou Rien de ce même automate. Ils demandent ensuite le stockage des valeurs de l'entrée et de la sortie dans le serveur de base de données par PCVue via SQL (voir illustration 6 ci-contre).

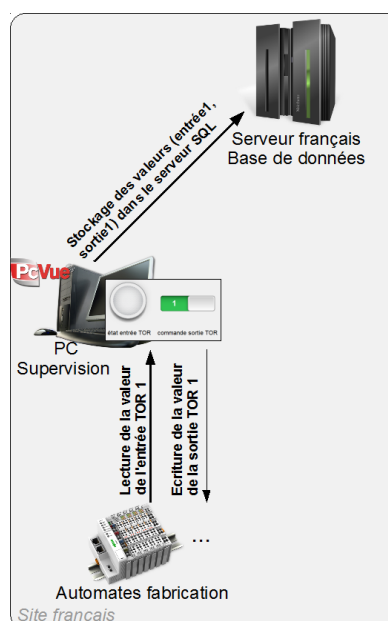


Illustration 6: Echanges entre les équipements du site Français

On reprend ensuite à travers ce TP les différentes étapes de la méthode pour sécuriser un site :

4.1. Sensibilisation des personnels

Les étudiants doivent expliquer rapidement la mise en place d'une politique de sensibilisation des personnels à la sécurité du site et à la cybersécurité, en insistant notamment sur le phishing, les clés USB, les fichiers douteux, le choix et le non stockage des mots de passe et l'alerte à donner en cas de détection d'un comportement suspect de machine.

4.2. Cartographie des installations et analyse du risque

Le site étant d'importance vitale et un contrôle à distance non nécessaire (un chef de production est toujours présent sur le site), l'analyse du risque amène à choisir de bloquer tous les accès entrants dans l'atelier. Les données de traçabilité doivent tout de même être disponibles pour les Danois. Elles seront partagées via un serveur SQL situé à l'extérieur de l'atelier, dans une DMZ. Une DMZ (zone démilitarisée, en référence à la zone « neutre » servant notamment pour l'échange de prisonniers entre les 2 Corée) est un sous-réseau du site accessible depuis l'extérieur et depuis les sous-réseaux sensibles du site (ici, l'atelier). Les équipements des sous-réseaux sensibles y déposent les données que les équipements extérieurs viendront y chercher, sans avoir besoin d'entrer dans le sous-réseau sensible.

Les données pourraient aussi, en plus, être stockées localement sur le PC de supervision (ou sur un serveur SQL dans l'atelier) si l'on voulait être sûr de les conserver en cas d'attaque. Pour tenir en 12h, nous ne retenons pas ce dernier point.

La cartographie des installations et l'analyse du risque amènent les étudiants à proposer l'architecture réseau suivante :

4.3. Prévention : défense en profondeur

Les étudiants câblent leur réseau et abordent alors les différents aspects de la défense en profondeur de l'installation.

4.3.1. Protection physique des équipements

Les étudiants doivent indiquer les mesures de protection physique minimales : armoires électriques et réseaux sous clés, accès à l'atelier et au local de supervision soumis à un contrôle d'accès strict, suppression des accès des employés ayant quitté l'entreprise.

4.3.2. Cloisonnement des réseaux et durcissement de leur configuration

Les étudiants configurent les pare-feux :

- Le routeur atelier refuse toutes les requêtes entrantes (fonctionnement en diode réseau) et n'accepte que les requêtes sortantes du PC de supervision vers le port 1433 du serveur SQL.
- Le routeur site français refuse également les requêtes entrantes. Il est configuré en VPN site-à-site avec le routeur site danois, ce qui permet un accès au serveur de base de données français par le serveur danois.

Sur les serveurs de base de données (des PCs de SQL Server Express), SQL Management Express sert de client SQL permettant de lire la base de données locale ou distante.

4.3.3. Durcissement du PC de supervision

Sur le PC de supervision, sur lequel les étudiants sont administrateurs :

- Vérification de l'activation du firewall du PC,
- Établissement d'un identifiant/mot de passe pour chaque utilisateur (le chef d'atelier et le technicien de maintenance) avec des droits limités (pas de possibilité d'installation de logiciels et pas de possibilité de modifier la configuration réseau),

établissement également d'une ségrégation des droits sous PCVue. Le chef d'atelier a les droits pour modifier la variable de sortie de l'automate. Le technicien de maintenance peut juste observer les variables,

pression du lecteur de CD,

blocage des médias amovibles usb : blocage de la détection des périphériques de stockage USB, désactivation du pilote de gestion des périphériques de stockage USB, désactivation de

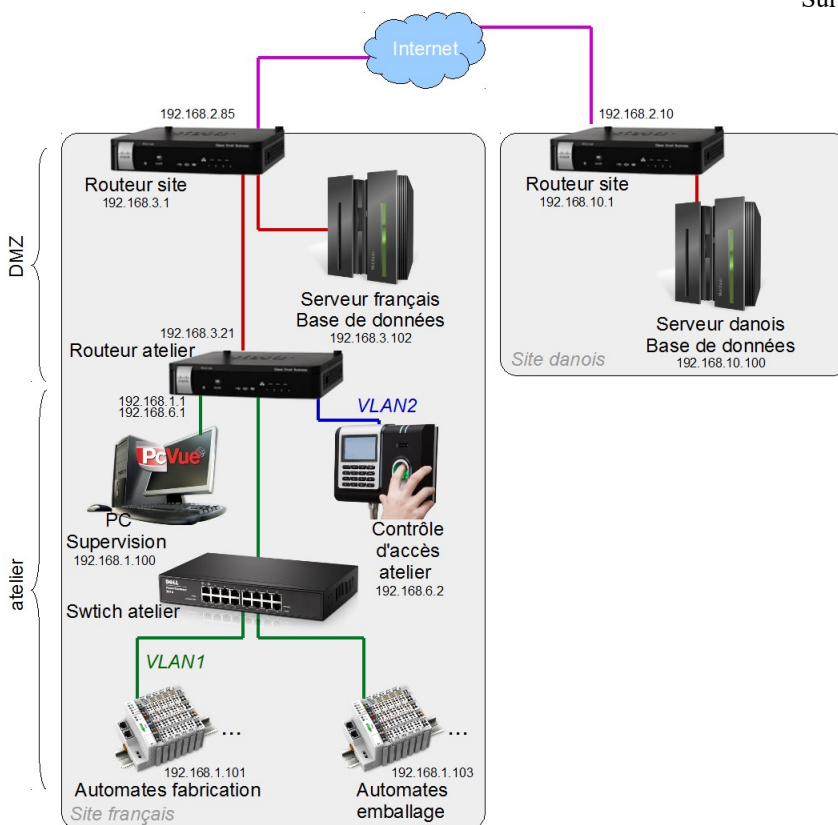


Illustration 7: Architecture réseau de l'entreprise de production de médicaments

l'exécution automatique, en suivant la procédure proposée sur le site de l'ANSSI.

- Indication du fait qu'il faudrait supprimer les logiciels autres que le superviseur PCVue du PC, en particulier les logiciels de programmation des automates, très dangereux (ils permettraient à une personne prenant le contrôle du PC de supervision de modifier les programmes de production des médicaments), et les logiciels de bureautique, très attaqués.

4.3.4. Durcissement des automates

Les étudiants récupèrent le firmware à jour chez le fabricant et le chargent dans les automates.

Ils désactivent le serveur web embarqué de l'automate. Les serveurs web embarqués sont très utilisés pour la configuration des équipements industriels mais sont vulnérables car utilisant des technologies web standard très attaquées.

4.4. Surveillance des installations et détection des incidents

- Les étudiants utilisent le port mirroring du routeur site et Wireshark pour surveiller les échanges réseaux. Ils peuvent vérifier que les trames extérieures au site sont bien cryptées (protocole ESP) et détecter les incidents,

Time	Source	Destination	Protocol	Length	Info
379 17.166214	192.168.2.10	192.168.2.85	ESP	310	ESP (SPI=0x51d0f1a7)
380 17.173467	192.168.10.100	192.168.3.102	TDS	246	SQL batch
381 17.174008	192.168.3.102	192.168.10.100	TDS	142	Response
382 17.175583	192.168.2.85	192.168.2.10	ESP	214	ESP (SPI=0x11bfd739)


```

Frame 379: 310 bytes on wire (2480 bits), 310 bytes captured (2480 bits) on interface 0
Ethernet II, Src: Cisco_aa:c7:24 (10:bd:18:aa:c7:24), Dst: Cisco_ab:c6:99 (10:bd:18:ab:c6:99)
Internet Protocol Version 4, Src: 192.168.2.10, Dst: 192.168.2.85
Encapsulating Security Payload

Frame 380: 246 bytes on wire (1968 bits), 246 bytes captured (1968 bits) on interface 0
Ethernet II, Src: Cisco_ab:c6:98 (10:bd:18:ab:c6:98), Dst: Dell_04:14:53 (d8:9e:f3:04:14:53)
Internet Protocol Version 4, Src: 192.168.10.100, Dst: 192.168.3.102
Transmission Control Protocol, Src Port: 4854, Dst Port: 1433, Seq: 20248, Ack: 7069, Len: 192
Tabular Data Stream
  
```

Illustration 8: Surveillance des échanges au niveau du routeur site

- Les étudiants ouvrent les journaux du routeur pour connaître l'historique des connexions VPN,
- Les étudiants ouvrent les journaux du serveur SQL (accessibles par SQL Management Studio) pour connaître l'historique des connexions au serveur SQL.

4.5. Traitement des incidents, chaîne d'alerte

Les étudiants proposent une procédure en cas de virus sur le serveur SQL : mise en place d'un archivage (archivage obligatoire pour la traçabilité de la fabrication de médicaments) local par exemple en attendant la remise en état du serveur SQL.

4.6. Veille sur les menaces et les vulnérabilités

Les étudiants proposent un plan de veille sur les mises à jour de sécurité du fabricant des automates, de Windows et de PCVue.

4.7. Les plans de reprise et de continuité d'activité

Les étudiants sauvegardent les programmes automates, l'application de supervision et les configurations des 2 routeurs sur un dossier qu'ils expliquent devoir garder sous clé sur une machine ou un support non connecté au réseau.

5. Conclusion

Le cours et le TP cybersécurité des systèmes industriels permettent aux étudiants d'être sensibilisés au risque cyber, de connaître les principales mesures à mettre en place pour sécuriser un site et de prendre conscience que ces mesures, à leur portée, permettent de contrer la plupart des attaques ciblées ou non contre le réseau informatique industriel.

Nous souhaitons à l'avenir ajouter à ce module la supervision via le protocole sécurisé OPC-UA, pris en compte par les automates industriels modernes (Siemens S7-1500, Schneider M251 par exemple). Il serait bon également d'évoquer les solutions de stockage de données dans le cloud, proposées désormais par les fabricants d'automates comme une solution sécurisée et désormais simplifiée évitant d'ouvrir des accès extérieurs à son site.

Réseau électrique industriel à échelle réduite

Application pédagogique

LABONNE ANTOINE

Ingénieur d'études
Grenoble INP/G2Elab/ENSE3
Antoine.labonne@grenoble-inp.fr

RULLIERE ELISABETH

Maître de Conférence
Grenoble INP/G2Elab/ENSE3
Elisabeth.rulliere@grenoble-inp.fr

PASCUINELLI DE MORAIS BRANDO

Elève Ingénieur ENSE3
Grenoble INP/G2Elab/ENSE3
brando.pascuineli-de-morais@grenoble-inp.org

BRACONNIER THIERRY

Ingénieur d'études
Grenoble INP/G2Elab/ENSE3
Thierry.braconnier@grenoble-inp.fr

Résumé : La plupart des études concernant les réseaux électriques utilisent des méthodes numériques pour modéliser ceux-ci. Cette solution est globalement moins coûteuse que la mise en œuvre in situ mais il est parfois difficile de modéliser certains phénomènes physiques et il s'avère particulièrement intéressant de construire un véritable réseau analogique à échelle réduite pour expérimenter de nouvelles configurations, comprendre des phénomènes relatifs à un réseau réel et/ou améliorer celui-ci. C'est pourquoi dans le cadre de la recherche mais aussi de l'enseignement, nous avons décidé de dimensionner une plateforme appelée PREDIS (Production et Réseaux d'Energie Distribuée), représentative de différentes structures de réseaux existants et du futur. Ce centre comprend 6 différents réseaux électriques (de type smartgrid et microgrid). Dans cet article, nous nous intéressons à un réseau électrique industriel (RI) à échelle réduite d'une puissance de 30kVA sous 400V représentant un réseau électrique réel de 300kVA sous une tension de 400V. Ce réseau électrique est supervisé par un système SCADA et une Interface Homme Machine (IHM). Nous présentons dans un premier temps la plateforme PREDIS puis nous nous focalisons sur l'utilisation du RI à des fins pédagogiques. Dans le cadre d'un TP de découverte des problématiques relatives aux réseaux électriques pour des élèves ingénieurs, nous faisons des mesures de tension, puissances active et réactive en différents points du RI. Le but est d'évaluer les chutes de tension le long des lignes et de mettre en œuvre une compensation statique de la puissance réactive consommée. Nous comparons ces mesures aux prévisions théoriques demandées aux élèves dans le cadre de leur préparation ainsi qu'aux valeurs issues d'une simulation fournie sous Matlab Simulink.

1. Introduction

Le domaine des réseaux électriques est actuellement en pleine expansion ; de nombreuses recherches sont menées pour comprendre, améliorer et rendre leur fonctionnement plus accessible [1], [2]. Lorsqu'on s'intéresse aux aspects statiques ou dynamiques des réseaux, on a la plupart du temps recours à des simulations numériques, en général bien moins coûteuses qu'une mise en œuvre expérimentale. Cependant, dans certains cas, celles-ci peuvent s'avérer incontournables pour mettre en place et valider des modèles, par exemple dans le cas où on a des boucles de régulation et/ou des phénomènes physiques complexes à prendre en compte. Outre le coût très élevé de la conception de tels dispositifs, il y a la maintenance à prendre en considération.

Nous avons choisi au G2elab et à l'ENSE3 de construire un système de réseaux électriques analogiques réels mais de puissance réduite en respectant un facteur d'échelle comme nous allons l'expliquer ci-dessous. Cet outil est destiné d'une part à valider des modèles numériques de réseaux électriques analogiques réels ; d'autre part il a une vocation pédagogique pour initier les étudiants à la problématique des réseaux électriques et à leur modélisation selon les phénomènes observés et étudiés. L'ensemble de ces « micro » réseaux réels d'une puissance apparente de 30kVA sous 400V s'intègre dans un centre de plateformes technologiques que nous avons appelé PREDIS (Production et Réseaux d'Énergie Distribuées). L'architecture de PREDIS permet d'accueillir jusqu'à 6 réseaux électriques d'études, mutualisant tous les mêmes consommateurs et producteurs réels. Chaque réseau électrique dispose de ses propres lignes, de ses propres technologies de l'information et de la communication, de sa propre structure, tous définis en fonction des thématiques envisagées.

Dans cet article, nous avons choisi de présenter un seul des 6 systèmes disponibles dans PREDIS, à savoir le réseau dit « industriel » ; de même, nous le présentons en tant qu'outil pédagogique d'initiation aux réseaux électriques dans le cadre de la première année de l'École Nationale Supérieure de l'Énergie, de l'Eau et de l'Environnement (ENSE3).

Dans une première partie nous présentons la plateforme PREDIS et sa configuration. Dans une deuxième partie nous nous focalisons sur le Réseau Industriel sur lequel porte notre étude en explicitant son dimensionnement et les éléments qui le constituent (sources, lignes, charges).

Dans une troisième partie nous expliquons succinctement comment nous avons modélisé le RI sous Matlab Simulink. La quatrième partie est consacrée à l'utilisation du RI à des fins pédagogiques dans le cadre d'un TP de découverte de la problématique des réseaux électriques. Nous précisons d'abord l'étude préparatoire demandée aux étudiants avant leur travail en salle. Puis nous présentons la mise en œuvre expérimentale de mesures de tension, puissance active et puissance réactive en différents points du réseau en prenant l'exemple d'une ligne alimentant un moteur asynchrone. Nous complétons ces relevés par la confrontation des résultats aux calculs théoriques de la préparation et à ceux issus de la simulation Matlab-Simulink.

Enfin, nous concluons et donnons quelques perspectives d'études futures.

2. Présentation succincte de l'architecture d'accueil des micros réseaux de PREDIS

Le configurateur du centre PREDIS permet de sélectionner le réseau d'étude concerné et d'affecter les différents producteurs et consommateurs au réseau étudié. Cet ensemble électromécanique relayé, permet de sélectionner le réseau électrique via l'automate principal de reconfiguration. La gestion des alimentations des simulateurs de charges et sources (Schx, Saltx sur la figure ci-dessous) est faite par un circuit séparé pour ne pas fausser le bilan de puissance. La structure générale de gestion de la configuration est décrite en Figure 1.

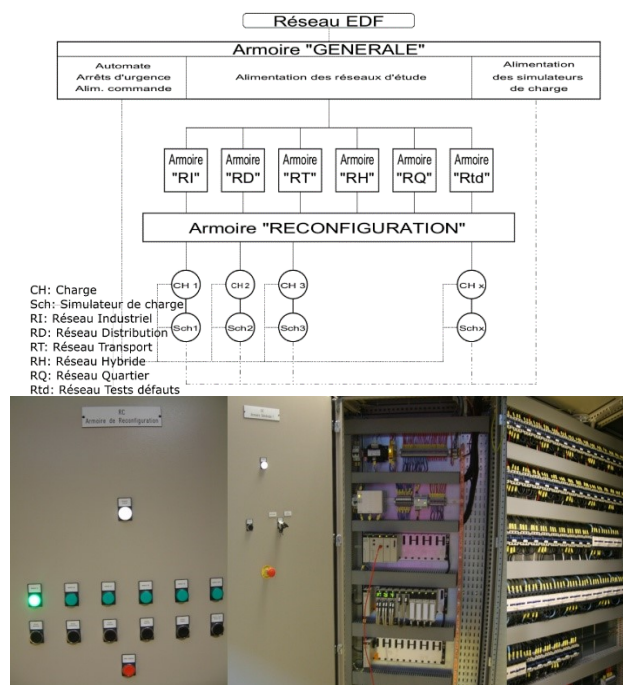


Figure 1: Architecture et photo de l'organe de sélection des micros réseaux du centre PREDIS

L'ensemble des charges et sources de PREDIS sont mutualisées pour tous les réseaux d'études. Seules celles utilisées par le Réseau Industriel seront présentées par la suite.

3. Réseau Industriel du centre PREDIS

3.1. Etude et dimensionnement

3.1.1. Les conditions de similitudes

3.1.1.1. Similitudes électriques

Notons Z_1 l'impédance du réseau réel et Z_2 celle du micro réseau. Le paramètre λ représente le rapport des puissances apparentes assignées et μ celui des tensions entre phase assignées :

$\lambda = S_2 / S_1$ avec S_1 la puissance apparente assignée du réseau réel en VA et S_2 la puissance apparente assignée du micro réseau.

$\mu = U_2/U_1$ avec U_1 la tension entre phases assignée du réseau réel en V et U_2 la tension entre phases assignée du micro réseau.

On a alors:

$$Z_2 = U_2/I_2 = (U_1/I_1) \cdot (I_1/I_2) \cdot (U_2/U_1) = Z_1 \cdot (U_2/U_1)^2 \cdot (S_1/S_2)$$

Soit :

$$Z_2 = Z_1 \cdot (\mu^2 / \lambda)$$

Équation 1: Similitudes électriques

3.1.1.2. Similitudes mécaniques

La condition de similitude mécanique s'exprime par l'égalité des temps de lancer (nommé : « t ») des parties tournantes homologues. Ce temps de lancer est fonction du moment d'inertie, de la vitesse de rotation et de la puissance active de chaque élément dynamique. On aura donc similitude mécanique à condition que:

$$t = (I1 \cdot \Omega1) / P1 = (I2 \cdot \Omega2) / P2$$

Avec:

I: Moment d'inertie (kg.m²)

P: Puissance active (W)

Ω : Fréquence de rotation (rad.s⁻¹)

Équation 2: Similitudes mécaniques et temps de lancer

Pour limiter les coûts du projet, les machines tournantes choisies pour le micro réseau sont des machines standards modifiées et non des machines sur mesures. Seul ALT1 a été modifié pour pouvoir régler indépendamment l'excitation.

3.1.1.3. Similitudes magnétiques

Les caractéristiques partielles des circuits magnétiques sont identiques. Pour les machines électriques, les caractéristiques à vide, ramenées à des ampères-tours nominaux d'excitation et à la tension nominale, sont superposables.

3.1.2. Choix du facteur d'échelle

Une étude préliminaire des facteurs d'échelle a été réalisée pour adapter l'ensemble des réseaux d'études du Centre PREDIS. Nous avons envisagé plusieurs échelles pour le réseau industriel et déterminé la longueur et le volume équivalents des lignes, les niveaux de tensions des nœuds, les courants des lignes, et les puissances installées des consommateurs. Le facteur d'échelle de **1/10** s'est avéré le mieux adapté pour l'ensemble des réseaux de PREDIS. Cette étude a été menée dans le cadre d'un Projet de Fin d'Etudes cité en [3] et d'une thèse CNAM cité en [4].

3.1.3. Caractéristiques principales du réseau Industriel

Le réseau industriel de PREDIS est un réseau basse tension 400V triphasé sans neutre distribué et de puissance réduite 30kVA. Il représente l'équivalent d'un réseau réel de 300kVA d'une petite entreprise industrielle. La structure est radiale comme le montre le schéma unifilaire et la photo du synoptique

de la *Figure 2*. Le schéma de liaison à la terre du Centre PREDIS est TN. La ligne i du réseau est repérée par L_i .

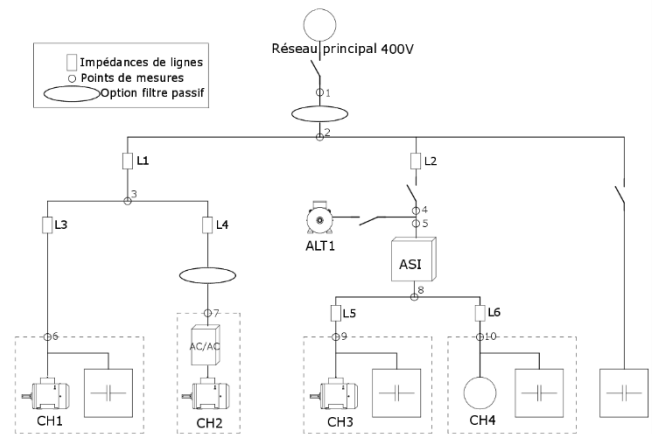


Figure 2: Schéma unifilaire du RI

Les caractéristiques retenues à l'issue de l'étude de dimensionnement sont consignées dans le tableau ci-dessous. Ce sont ces grandeurs qu'on utilisera dans l'article.

Réseau	Réel industriel Echelle 1	Microréseau RI Echelle 1/10
Puissance apparente (kVA)	300	30
Tension (V _{AC})	400	400
Nombre de sources	3	3
Nombre de charges	4	4
Nombre de lignes	6	6
Nombre de nœuds	10	10
Nombre de compensateurs de réactif	4+1 compensateur synchrone	4+1 compensateur synchrone
Nombre filtre harmonique (passif)	1	1 (en tête et au niveau de CH2)

Tableau 1 : Grandeurs caractéristiques du réseau RI

3.2. Les éléments du RI

3.2.1. La supervision du réseau industriel

Deux modes de supervision sont prévus. Un mode de supervision de type « Interface Homme-Machine » (IHM) représenté en *Figure 3* et un mode de supervision de type « System Control and Data Acquisition » (SCADA) représenté en *Figure 4*.



Figure 3: Interface Homme Machine ou Synoptique de commande RI

3.2.1.1. L'interface Homme machine

L'interface Homme machine (IHM) représenté en *Figure 3* permet le pilotage et le contrôle commande du réseau Industriel. Un automate de configuration industriel reporte aux supervisions l'état de 180 Entrées /Sorties TOR, 32 Entrées / Sorties analogiques, et l'état des communications de terrain (modbus et TCP/IP). 10 centrales de mesures de type PM850 permettent les mesures de courant, tension, puissances, énergies, jusqu'au 63ème rang harmonique, à raison de 3000 données par centrale. Toutes les charges (consommateurs) et les sources (producteurs) sont équipées de mesures de vitesses et de couples. Les états des protections électriques sont également visibles sur l'IHM. L'interface permet le pilotage indépendamment du système de supervision expert SCADA.

3.2.1.2. Le Superviseur SCADA

Le réseau Industriel peut également être supervisé par un SCADA développé avec le logiciel PcVue. Les fonctions implantées dans le superviseur sont les suivantes :
Le contrôle commande des producteurs et consommateurs du réseau, les visualisations des points de mesures et des courbes de tendance, la visualisation des alarmes et des disjoncteurs.

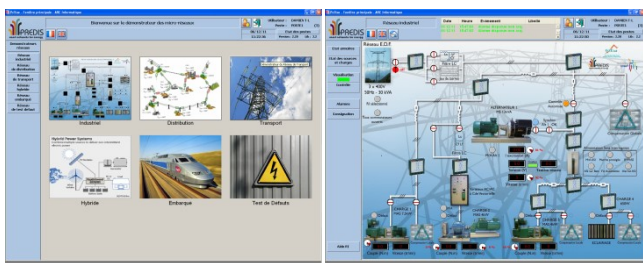


Figure 4: Supervision Informatique des réseaux de PREDIS et du RI

Un service de secours de données est assuré par une redondance des serveurs 1 et 2. La Figure 5 synthétise cette architecture de serveurs.

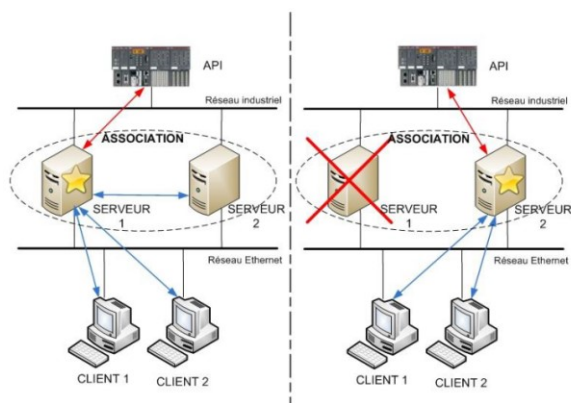


Figure 5: Organisation des serveurs hébergeurs du Superviseur de PREDIS

L'ensemble du réseau industriel est instrumenté à chaque nœud et au niveau de chaque consommateur et producteur. Les mesures de courants sont effectuées par transformateur d'intensité et les mesures de tension sont directes. Toutes ces mesures sont remontées via l'automate configurateur au superviseur.

3.2.2. Les lignes du réseau industriel

Pour modéliser les lignes, nous avons fait le choix d'un modèle en Pi représenté en *Figure 6*.

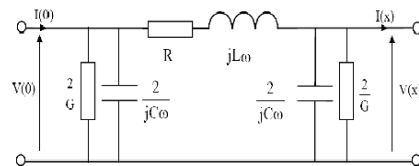


Figure 6: Modèle en Pi

Après plusieurs simulations nous avons montré que les capacités pouvaient être négligées et nous avons donc retenu le modèle simplifié de la *Figure 7* à savoir un modèle LR basse fréquence.

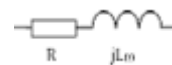


Figure 7: Modèle LR

Les valeurs caractérisant les différentes lignes du réseau industriel sont données dans le *Tableau 2* ainsi que celles relatives au réseau réel.

	Réseau réel		Micro réseau			In A	Ic A
	R (mΩ)	X (mΩ) 50Hz	R (mΩ)	X (mΩ) 50Hz	L (μH)		
L1	7,89	58,4	78,9	584	1860	25	170
L2	14,45	57,46	144,5	574,6	1830	25	250
L3	15,47	2,83	154,7	28,3	90	15	150
L4	14,19	2,51	141,9	25,1	80	9	20
L5	17,2	3,2	172	32	102	8,5	85
L6	22,45	3,2	224,5	32	102	2,5	25

Tableau 2: Valeurs des impédances de lignes mesurées

Le synoptique donné en *Figure 8* rassemble les paramètres des réseaux réels et réduits avec les longueurs émulées correspondantes (complément du *Tableau 2*). Cette représentation permet d'avoir une vision d'ensemble des données nécessaires à l'article.

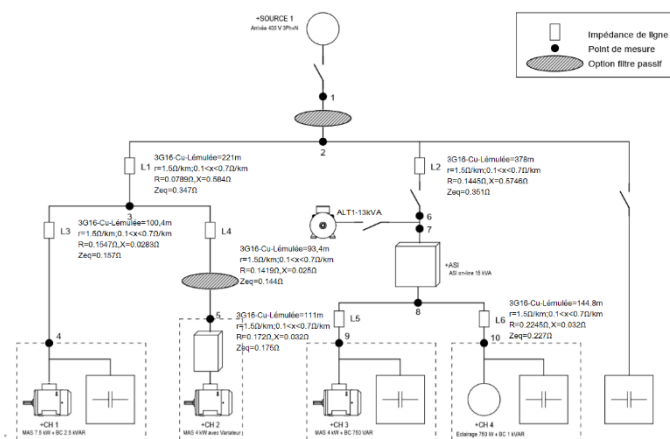


Figure 8: Ensemble des paramètres de lignes réelle du RI

3.2.3. Les charges (consommateurs) et sources (producteurs)

Le réseau industriel comporte une diversité de consommateurs et de producteurs mutualisés au centre PREDIS. L'ensemble de ces éléments est détaillé ci-dessous. Chaque consommateur ou producteur a deux modes de fonctionnement ; il peut être piloté par la face avant de sa baie de pilotage (fonctionnement en « local ») ou alors « à distance » par le superviseur ou l'interface Homme Machine. Cette fonctionnalité permet d'avoir une vision isolée du réseau ou une vue système. Remarque: la présence nombreuse des moteurs asynchrones à vitesse fixe ou variable est représentative des réseaux industriels, puisqu'ils constituent environ 80 % des charges d'un réseau (pompes, ventilateurs, ...). Les détails relatifs à tous les éléments du réseau se trouvent en Annexe 1.

3.2.3.1. La charge 1 (CH1)

Cette charge est composée d'une machine asynchrone de 7.5kW raccordée directement sur le réseau électrique ; elle

entraîne une charge mécanique constituée par un moteur à courant continu raccordé au réseau électrique via un variateur de vitesse DC/AC. Les caractéristiques et paramètres techniques de cette charge sont toutes présentées en Annexe 1.

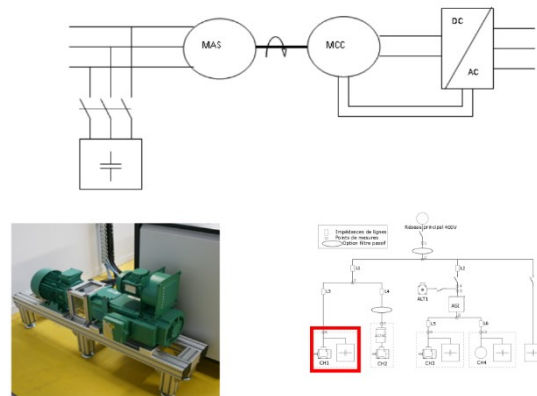


Figure 9: Schéma de principe et emplacement dans le RI de CH1

3.2.3.2. La charge 2 (CH2)

La charge 2 est un motorréducteur (moteur asynchrone intégrant un réducteur de vitesse) de 4 kW raccordé au réseau électrique via un variateur de vitesse AC/AC. Sa charge est constituée d'un frein à poudre à courants de Foucault de 5 kW, commandé en couple, et refroidi par le circuit d'eau industrielle, lui-même contrôlé en température à 20°C par une sonde.

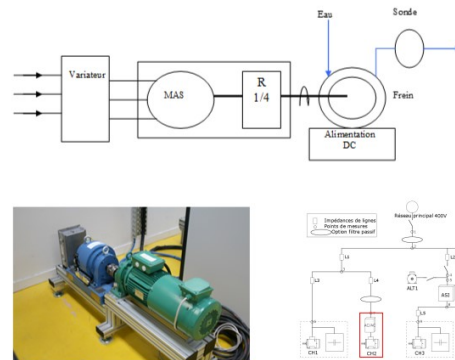


Figure 10: Schéma de principe et emplacement dans le réseau de CH2

3.2.3.3. La charge 3 (CH3)

La charge 3 est un moteur asynchrone de 4 kW raccordé directement au réseau électrique. Il entraîne un moteur à courant continu raccordé au réseau via un variateur de vitesse DC/AC.

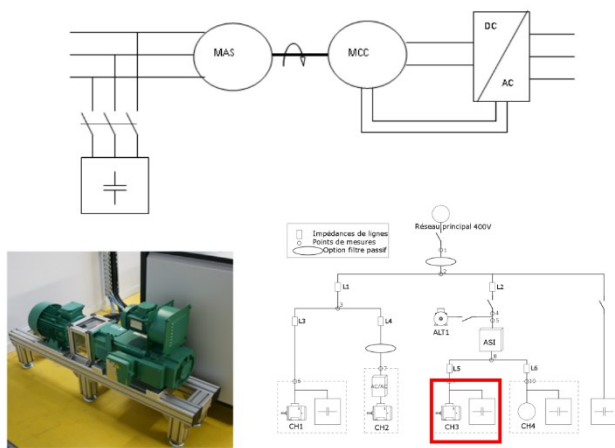


Figure 11: Schéma de principe et emplacement dans le RI de CH3

3.2.3.4. La charge 4 (CH4)

La charge 4 représente la consommation électrique nécessaire pour assurer l'éclairage du site. Elle est constituée de neuf réglettes d'éclairage de nature domestique, équipées chacune de deux tubes fluorescents de 36 W chacun. Ces réglettes d'une puissance totale de 648W sont alimentées au travers d'un transformateur triphasé (400V/230V) et sont raccordées en couplage triangle par groupe de trois.

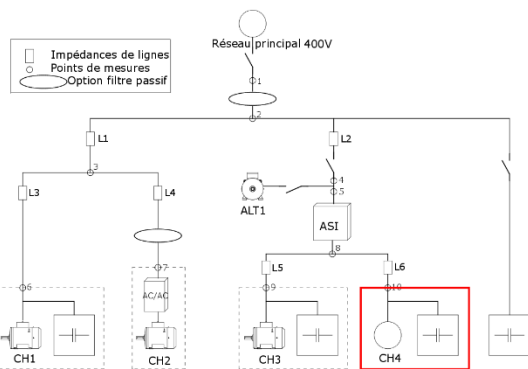


Figure 12: Schéma de principe et emplacement dans le réseau de CH4

3.2.3.5. L'alternateur de secours (ALT1)

Un groupe de secours (ALT 1) a été installé afin de secourir les charges du réseau jugées essentielles, en cas de panne du distributeur. Ce genre d'alternateur est généralement entraîné par un moteur diesel ou une turbine à gaz, mais dans notre cas, ce rôle sera assuré par un moteur asynchrone (SALT1) piloté par un variateur de vitesse AC/AC et équipé d'un synchroniseur de réseau contrôlant fréquence et tension réseau. ALT1 peut fonctionner selon 2 modes principaux : Soit il est couplé au réseau industriel (connexion à un réseau de « puissance infinie »), soit il est en mode secouru pour alimenter uniquement CH3 et CH4 (fonctionnement d'un réseau îloté).

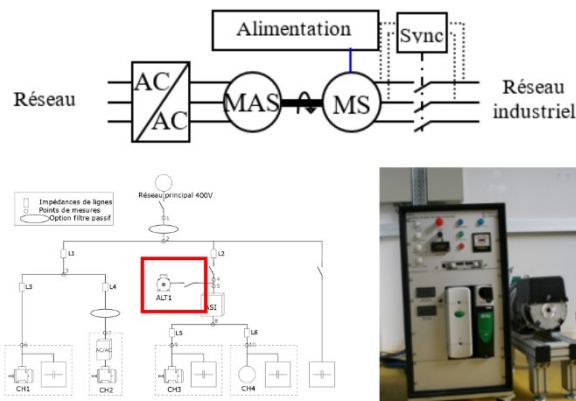


Figure 13: Schéma de principe et emplacement dans le RI de ALT1

3.2.3.6. L'alimentation sans interruption (ASI)

Pour parer à toute coupure de l'alimentation électrique, une Alimentation Sans Interruption (ASI) de 15 kW de chez Schneider Electric de type statique et « on-line » a également été insérée dans le réseau. Sa puissance est de 15 kVA. Cette ASI est surdimensionnée pour le réseau industriel qui ne compte que 5 kVA de charge mais elle a été sélectionnée pour pouvoir s'intégrer, via la reconfiguration, dans les autres réseaux du centre PREDIS. L'ASI assure donc la période transitoire (10 min à pleine charge), le temps que l'alternateur 1 démarre. Ceci permet de représenter une séquence réelle de reprise d'un réseau secouru d'énergie.

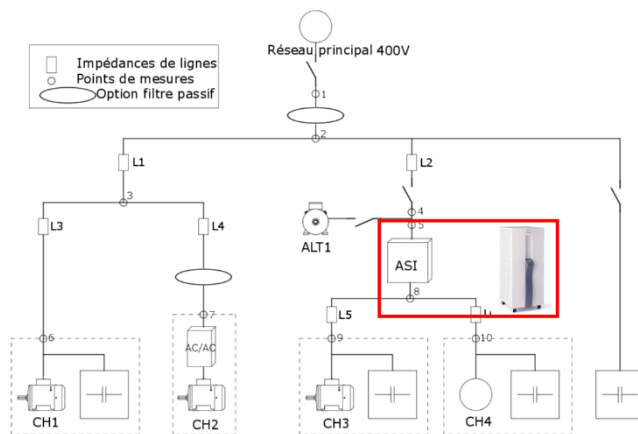


Figure 14: Schéma de principe et emplacement dans le réseau de l'ASI

3.2.4. Le filtrage d'harmoniques

Un filtre de type passif permet le filtrage des harmoniques de courant. Il a été dimensionné et fabriqué pour atténuer l'harmonique de rang 5. Les emplacements de ce filtre sont soit proches de la charge polluante soit en tête de réseau. Il est constitué de l'association d'une capacité C_f avec 2 inductances triphasées L_s , L_f comme le montre la Figure 15.

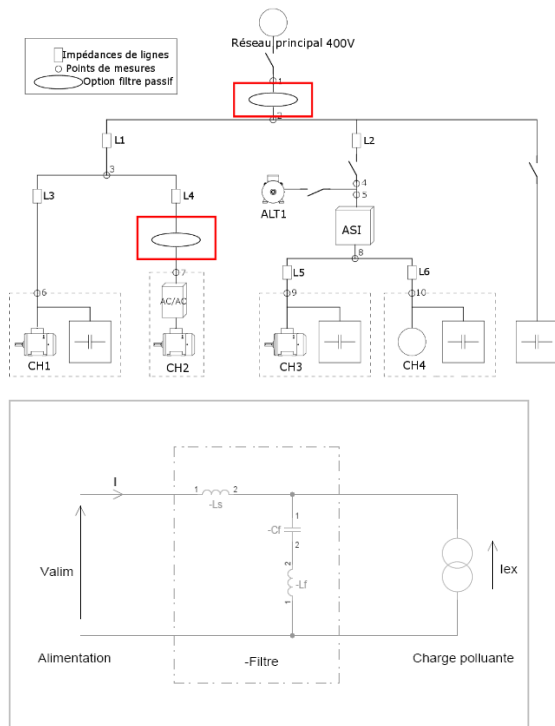


Figure 15: Emplacement du filtre passif et structure associée

3.2.5. Les compensateurs d'énergie réactive

Des dispositifs de compensation de l'énergie réactive peuvent être raccordés au réseau électrique, soit au niveau des charges (compensation locale) soit en tête d'installation (compensation globale). La norme impose pour une installation électrique un facteur de puissance ($\cos\varphi \geq 0.93$ ou $\tan\varphi \leq 0.4$). Par choix pédagogique, nous avons choisi de construire les bancs de compensation d'énergie réactive en vue d'une correction évolutive de manière à montrer l'impact de celle-ci sur la tension du réseau électrique. Parmi ceux-ci nous avons un banc de compensation d'énergie réactive globale en tête de l'installation, un banc de compensation locale au niveau de CH1 et CH3, et un banc de compensation locale au niveau de CH4. A ces bancs de compensation statique d'énergie, se rajoute un compensateur synchrone géré par ALT1. L'ensemble des compensations d'énergie réactive possibles sont rassemblées sur la Figure 16, et décrites en Annexe 2.

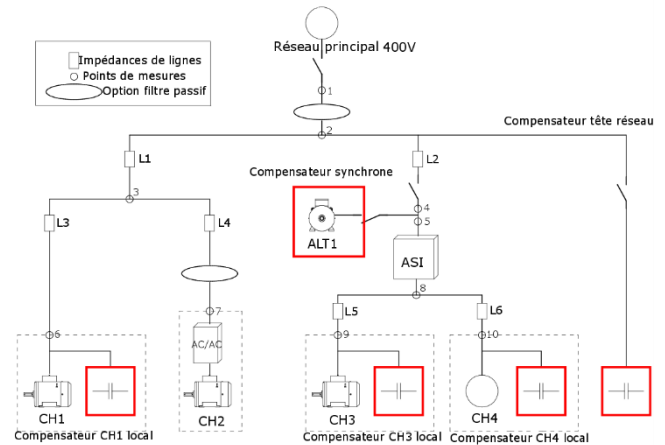


Figure 16: Emplacement des compensations d'énergie réactive du RI

4. Modèle du réseau sous Matlab Simulink

Comme nous l'avons précisé en introduction, il est de nos jours quasiment incontournable de disposer d'une simulation numérique pour les réseaux électriques notamment pour leur dimensionnement et la prédiction de leur fonctionnement statique ou dynamique. Il existe de nombreux logiciels industriels de simulation des réseaux électriques, chacun ayant ses spécificités et ses applications suivant les phénomènes modélisés. On peut citer par exemple Eurostag ou Power Factory dédiés à l'étude statique et dynamique de réseaux de distribution. D'autres outils comme ATP-EMTP, sont plus dédiés à la simulation de phénomènes électromagnétiques. Dans cette étude, pour des raisons de simplicité, nous nous proposons d'utiliser la Tool-box « Power Systems » de Matlab/Simulink. Le réseau complet a été simulé en utilisant les paramètres des lignes et des machines (cf. Annexe 1). La figure ci-dessous regroupe l'ensemble du réseau simulé.

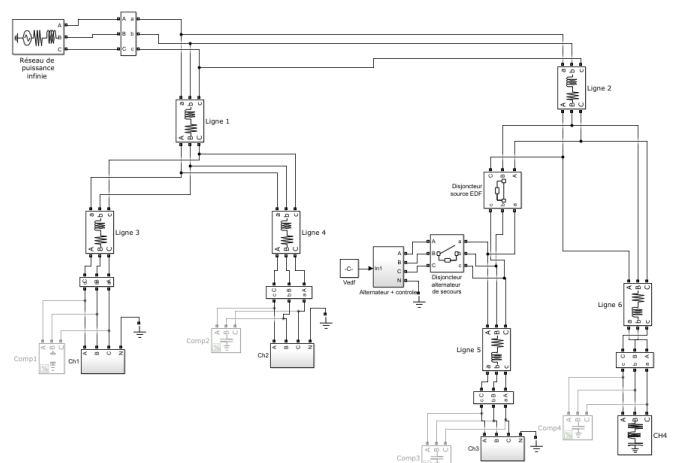


Figure 17: Modélisation du réseau RI de PREDIS

5. Utilisation du réseau industriel à des fins pédagogiques

Nous présentons maintenant un des TP que nous avons mis en œuvre pour initier les étudiants de 1^e année de l'ENSE3 à la problématique des réseaux électriques en s'appuyant sur le réseau RI. Il se compose d'une première partie préparatoire à faire avant le TP et de la séance de travail en salle.

5.1. Préparation

Un tableau récapitulatif est fourni donnant les grandeurs assignées relatives à toutes les charges, aux bancs de compensation réactive, à l'alternateur de secours, à l'alimentation de secours et aux lignes. L'étudiant doit calculer la puissance active -notée P_e - et réactive -notée Q_e - consommées par les charges pour différents régimes. Afin d'illustrer notre propos, nous prendrons l'exemple de la branche 1 constituée d'un moteur asynchrone de 7,5 kW raccordé directement sur le réseau ($U=418V$ entre phase).

Ses caractéristiques nominales sont les suivantes :
Puissance mécanique (P_m): 7,5 kW, Rendement η : 87 %, Facteur de puissance ($\cos \varphi$): 0,82, Vitesse de rotation: 1450 tr.min-1, Couple nominal: 48,4 N.m, Courant nominal : 15,2 A

Les courbes de rendement et du facteur de puissance en fonction de la puissance mécanique sont données en Annexe 1.

Les éléments de ligne reliant la source à CH1 sont L_1 et L_3 (cf. Tableau 2). On demande de calculer les puissance active P_e et réactive Q_e du moteur, ainsi que la chute de tension théorique relative entre la source et CH1 :

$$P_e = P_m / \eta$$

$$Q_e = P_e \tan(\arccos \varphi)$$

Les paramètres de la ligne reliant la source à la charge sont obtenus à partir des valeurs fournies dans le *Tableau 2* :

$$R_{\text{ligneCH1}} = R_{L1} + R_{L3} = \mathbf{233.6 \text{ m}\Omega}$$

$$X_{\text{ligneCH1}} = X_{L1} + X_{L3} = \mathbf{612.3 \text{ m}\Omega}$$

La chute de tension relative le long de la ligne notée $\Delta U/U$ se calcule à l'aide de la formule [7]:

$$\Delta U/U = \frac{R_{\text{ligneCH1}} \cdot P + X_{\text{ligneCH1}} \cdot Q}{U^2}$$

Équation 3: Chute de tension relative

Ensuite les étudiants dimensionnent les condensateurs pour réaliser la compensation d'énergie réactive en un point donné en utilisant la formule ci-dessous.

$$\Delta Q = P_e \cdot (\tan(\varphi) - \tan(\lambda))$$

$$\tan(\varphi) = Q_e/P_e \text{ et } \tan(\lambda) = 0.4 \text{ pour } \cos(\lambda) = 0.93$$

Avec :

φ : déphasage de l'installation avant correction

λ : déphasage que l'on souhaite obtenir après correction

P_e : somme des puissances actives (W)

Q_e : somme des puissances réactives (VAr)

ΔQ : puissance réactive de compensation (VAr)

Équation 4: Dimensionnement d'une compensation réactive

Le calcul de la capacité C nécessaire à la compensation ΔQ est donné par la formule ci-dessous :

$$C = \Delta Q / (3U^2\omega)$$

Equation 5: Calcul de la capacité C (μF)

Les résultats sont rassemblés dans le Tableau ci-dessous :

	$P_m=4500W$	$P_m=7500W$
Rendement η	0,87	0,87
Cos φ	0,82	0,82
P_e théorique (W)	5172	8621
Q_e théorique (VAr)	5731	6017
$\Delta U/U$ (%)	2,69	3,3
U _{CH1} (V)	407,5	405,3
ΔQ (VAr)	-3662	-2569
C (μF)	22	16

Tableau 3: Ensemble des résultats de la préparation

5.2. Travail en salle

Les étudiants découvrent avec leur enseignant le Réseau Industriel et son environnement. Au début, les étudiants se familiarisent avec le modèle du RI qui leur est fourni sous Matlab Simulink et caractérisent chacun des éléments (charges, sources, lignes...) conformément aux valeurs du réseau industriel qui leur sont données et qu'ils ont utilisées en préparation. Pour les objectifs, il s'agit premièrement de confronter la valeur de la chute de tension aux bornes de chaque ligne obtenue par le calcul théorique (partie préparation) à celle obtenue par mesures sur le RI puis par simulation sous Matlab Simulink.

Dans un second temps, on évaluera les puissances active et réactive en tête du réseau et au niveau de chacune des charges, par la simulation et les mesures sur le RI aux points de fonctionnement pour lesquels ont été faits les calculs en préparation. On mesurera également le facteur de puissance ou $\tan \varphi$. On pourra envisager le fonctionnement d'une charge seule ou de plusieurs charges simultanément. Les étudiants concluront sur la nécessité de compensation de puissance réactive et devront évaluer la capacité des condensateurs à mettre en place pour réaliser la correction à partir de leur préparation. Ils procéderont ensuite à la compensation prévue sur le RI (locale ou globale) et confronteront leurs résultats à leurs calculs théoriques. Dans la suite pour illustrer notre propos, nous considérerons le cas où le réseau alimente uniquement la charge 1 (cf. Figure 18).

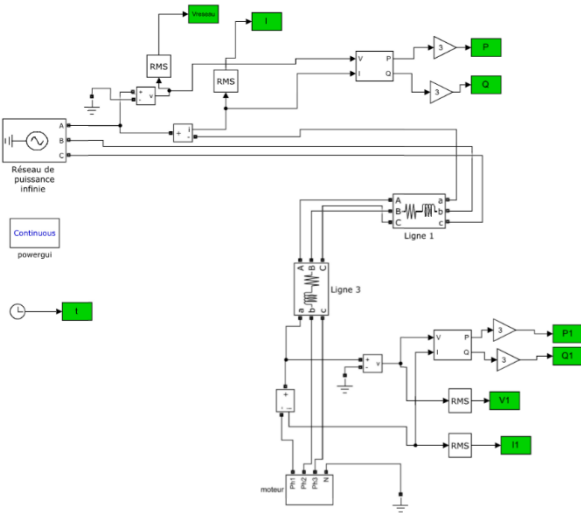
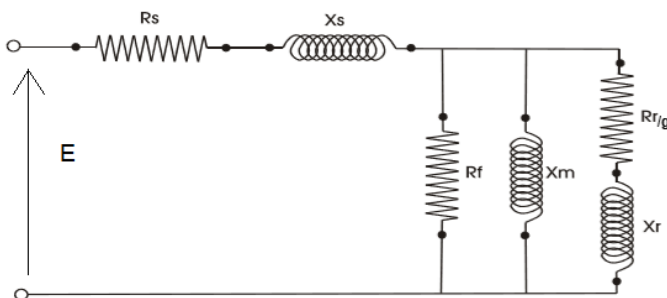


Figure 18: Représentation de la branche 1 sous Matlab Simulink

A noter que pour la représentation de la charge 1 (CH1) sous Matlab Simulink, le moteur asynchrone est représenté par un schéma électrique classique que les étudiants ont vu en cours magistral (cf.

Résistance stator / stator resistance	R_s	2.2881 Ω
Résistance pertes fer / iron losses resistance	R_f	599.4 Ω
Résistance rotor / rotor resistance	R_r	1.5122 Ω
Réactance stator / stator reactance	X_s	1.343 Ω
Réactance rotor / rotor reactance	X_r	4.312 Ω
Réactance de magnétisation / magnetising reactance	X_m	45.498 Ω
FEM / EMF	E	207.1 V
Glissement / Slip	g	5.10 %

Figure 19).



Résistance stator / stator resistance	R_s	2.2881 Ω
Résistance pertes fer / iron losses resistance	R_f	599.4 Ω
Résistance rotor / rotor resistance	R_r	1.5122 Ω
Réactance stator / stator reactance	X_s	1.343 Ω
Réactance rotor / rotor reactance	X_r	4.312 Ω
Réactance de magnétisation / magnetising reactance	X_m	45.498 Ω
FEM / EMF	E	207.1 V
Glissement / Slip	g	5.10 %

Figure 19: Représentation connexe par phase de CH1

5.2.1. Etude des chutes de tensions

La simulation Matlab Simulink utilise comme grandeurs d'entrées la tension de source (choisie égale à 418V) ainsi que la vitesse de rotation de la MAS et calcule les puissances électriques active et réactive, la tension aux bornes de la charge

et le courant qui la traverse. Pour ce qui est des mesures sur le réseau RI, les essais sont réalisés en faisant varier la charge du moteur asynchrone. On relève la vitesse à l'aide d'un tachymètre ainsi que la tension, le courant, et les puissances de la charge à l'aide des centrales de mesures du synoptique de commande. La Figure 20 représente la chute de tension obtenue par simulation à puissance nominale. Le Tableau 4 regroupe l'ensemble des points de fonctionnement issus de la simulation et des mesures du RI.

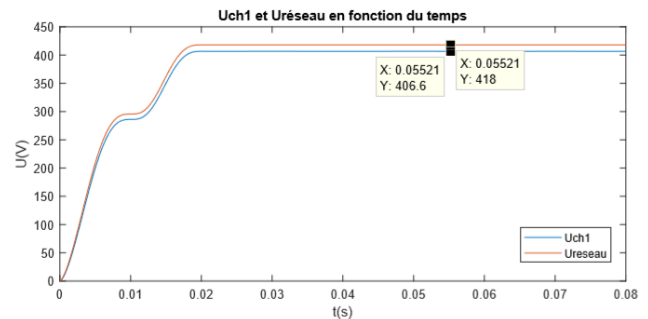


Figure 20: Résultat de la simulation pour un fonctionnement nominal de la MAS : tension entre phases de CH1 et du réseau principal

Le tableau ci-dessous donne les résultats obtenus par la mesure sur le RI et en simulation, de la tension aux bornes de CH1 ainsi que de la chute de tension entre la source et CH1 en %, notée $\Delta U/U$. Y sont également consignés les résultats théoriques.

	$P_m=4500W$	$P_m=7500W$
$U_{CH1mesurée}$ (V)	405,5	402,0
$U_{CH1simulée}$ (V)	409,9	407,1
$U_{CH1théorique}$ (V)	407,5	405,3
$\Delta U/U_{mesurée}$ (%)	3,11	3,94
$\Delta U/U_{simulée}$ (%)	2,04	2,73
$\Delta U/U_{théorique}$ (%)	2,69	3,25
Ecart (%)	0.50	0.83
$U_{CH1mes}/U_{CH1théorique}$		
Ecart (%)	0.59	0.43
$U_{CH1simulée}/U_{CH1théorique}$		

Tableau 4: Ensemble des points simulés et mesurés et théorique de CH1 à $U_{reseau}=418V$

Les résultats obtenus tant en simulation que par mesure sur le réseau RI sont très proches de ceux obtenus, ce qui est très satisfaisant sachant que les valeurs des inductances et capacités des lignes du RI sont connues à 10% près. On notera que les points de fonctionnement choisis correspondent à un rendement du moteur quasiment constant et maximum.

5.2.2. Mesures des puissances et compensation statique

5.2.2.1. Interprétation simulation et mesures

Le Tableau 5 donne pour les 2 points de fonctionnement choisis la puissance électrique active et réactive, le facteur de puissance et la puissance réactive de compensation (ΔQ). Y sont consignés les résultats théoriques, ceux mesurés sur le RI et ceux issus de la simulation.

	$P_m=4500W$	$P_m=7500W$
$P_{mesurée}$ (W)	5172	8621
$P_{simulée}$ (W)	4766	7761
$P_{théorique}$ (W)	5172	8621
Ecart $P_{e\ mesure/theorie}$ (%)	0	0
Ecart $P_{e\ simulée/theorie}$ (%)	7.8	10
$Q_{mesurée}$ (VAr)	6479	6781
$Q_{simulée}$ (VAr)	3892	4572
$Q_{théorique}$ (VAr)	5731	6017
Ecart $Q_{e\ mesure/theorie}$ (%)	13	7.7
Ecart $Q_{e\ simulée/theorie}$ (%)	32	24
$\Delta Q_{mesurée}$ (VAr)	-4410	-3333
$\Delta Q_{simulée}$ (VAr)	-1986	-1468
$\Delta Q_{théorique}$ (VAr)	-3662	-2569

Tableau 5: Valeurs théoriques mesurées et simulées des puissances pour CHI

Les mesures sur le RI ont été faites en réglant la puissance active à la valeur prise pour les calculs théoriques d'où un écart nul évidemment entre ces 2 valeurs. Nous constatons un écart inférieur ou égal à 10% entre les puissances actives simulées et théoriques, ce qui est tout à fait acceptable. Pour ce qui est de la puissance réactive, les écarts entre la théorie et la mesure sur le RI restent inférieurs à 13%. Ils sont plus importants quand il s'agit de la simulation comparée à la théorie, un peu au-delà des incertitudes relatives aux valeurs des éléments des lignes.

5.2.2.2. Mise en œuvre de la compensation de puissance réactive

Les étudiants introduisent alors sur le RI les compensations prévues : locales ou en tête de réseau et refont les mesures des puissances réactives. Le *Tableau 6* consigne les résultats. Il est à noter une légère différence entre les puissances mesurées, car les 2 campagnes de mesures ont été faites l'une à froid, l'autre à chaud.

	$P_m=4500W$			
	Au niveau de CHI		En tête de réseau	
	Sans compensation	Avec compensensation locale	sans compensation	Avec compensation en tête de réseau
$P_{mesurées}$ (W)	5134	5134	5160	5160
$Q_{mesurée}$ (VAr)	6220	2490	6455	2429
	$P_m=7500W$			
	Au niveau de CHI		En tête de réseau	
	Sans compensation	Avec compensensation locale	sans compensation	Avec compensation en tête de réseau
$P_{mesurée}$ (W)	8455	8455	8505	8505
$Q_{mesurée}$ (VAr)	6377	2525	6760	2780

Tableau 6: Mesures des puissances réactives avec ou sans compensation

Si l'on prend l'exemple du point de fonctionnement nominal, au niveau de la charge 1, on a mesuré $Q_{mesurée} = 6377$ VAr sans compensation. Pour $\tan(\lambda) = 0.4$, la puissance réactive vaut $P_{mesurée} \times 0.4 = 3382$ VAr. Il faut donc apporter une puissance réactive $\Delta Q_{mesurée} = -6377 + 3382 = -2995$ VAr, ce qui correspond pour une tension de 418V, à placer 3 condensateurs

entre phases d'une valeur de $C = 18\mu F$. Cette valeur est à comparer d'une part à la valeur théorique prévue $16\mu F$ et à la valeur implémentée sur le RI qui est de $15\mu F$ +/- 20%. On constate que ces trois valeurs corroborent à +/- 20%.

Nous venons de présenter une utilisation à fins pédagogiques du réseau RI de la plateforme PREDIS. Les résultats obtenus qui sont similaires à ceux obtenus par la théorie et la simulation montrent la pertinence de ce réseau à échelle réduite pour des études statiques de réseaux réels et bien évidemment son utilité en enseignement. Cette étude pourrait être avantageusement complétée par la mise en œuvre d'une compensation « synchrone » en utilisant la machine synchrone dénommée ALT1 en amont des charges CH3 et CH4 et en faisant varier son excitation. Il serait également judicieux d'étudier l'effet de l'ASI en terme de compensation d'énergie réactive puisque celle-ci intègre un PFC [5].

6. CONCLUSION ET PERSPECTIVES

Nous avons décrit le centre PREDIS mis en œuvre à l'ENSE3 en collaboration avec le laboratoire G2ELab dont l'originalité est de représenter diverses configurations de réseaux électriques réels mais à échelle réduite et de permettre des expérimentations in situ pour comprendre des phénomènes physiques statiques ou dynamiques sur des réseaux réels existants (réglage de tension, concept d'auto cicatrisation de réseau, ou insertion de limiteur supraconducteur entre autre). La vocation pédagogique de cet outil puissant a été mise en avant au travers de la découverte de la problématique des réseaux et des systèmes proposés aux étudiants en 1^{ère} année du cycle d'études d'Ingénieur de l'ENSE3. PREDIS sert également aux Masters Internationaux et aux élèves de 3^{ème} année (spécialité « Power System ») de la filière IEE (Ingénierie de l'Energie Electrique) sur les fonctions avancées de conduites de réseaux [6].

Dans le domaine de la recherche, d'autres études sont menées sur PREDIS, notamment les études de topologie (réseaux DC/AC, microgrid, smartgrid), stabilité et plan de protection... Cette plateforme est également couplée à des organes de simulation temps réel, permettant d'accroître l'interaction de systèmes hybrides communément appelé (Power Hardware In the Loop) dans le but de les rendre interopérable. Enfin, PREDIS est utilisée à des fins de formation continue, pour des entités telles que INES, INSA... Elle a également un rôle d'expertise pour des PME qui souhaitent valider des projets. Comme par exemple, la validation de la connexion d'un stockage d'énergie associé à un Battery Management System (10 kVA) avec une startup locale.

7. Annexes

Annexe 1: Descriptif des éléments du RI

Charge/Source	Equipements et Paramètres																								
CHI (7.5kW)	<p>Banc machines et mode de pilotage MAS type LS 132MT associé à MCC type LSK1124 Pilotage MAS sans variateur (démarrage direct) Pilotage MCC par Variateur DMV 2342 AC/DC réversible</p> <p>Plaque signalétique MAS : Puissance : 7,5 kW, Rendement : 87 %, Facteur de puissance : 0,82, Vitesse de rotation : 1450 tr/mn Couple nominal : 48,4 N.m, Courant nominal : 15,2A</p> <p>Caractéristiques de CHI (MAS)</p> <table border="1"> <tbody> <tr> <td>Résistance stator / stator resistance</td> <td>R_s</td> <td>2.2881 Ω</td> </tr> <tr> <td>Résistance pertes fer / iron losses resistance</td> <td>R_f</td> <td>599.4 Ω</td> </tr> <tr> <td>Résistance rotor / rotor resistance</td> <td>R_r</td> <td>1.5122 Ω</td> </tr> <tr> <td>Réactance stator / stator reactance</td> <td>X_s</td> <td>1.343 Ω</td> </tr> <tr> <td>Réactance rotor / rotor reactance</td> <td>X_r</td> <td>4.312 Ω</td> </tr> <tr> <td>Réactance de magnétisation / magnetising reactance</td> <td>X_m</td> <td>45.498 Ω</td> </tr> <tr> <td>FEM / EMF</td> <td>E</td> <td>207.1 V</td> </tr> <tr> <td>Glissement / Slip</td> <td>g</td> <td>5.10 %</td> </tr> </tbody> </table> <p>Essais en charge et couple CHI</p>	Résistance stator / stator resistance	R_s	2.2881 Ω	Résistance pertes fer / iron losses resistance	R_f	599.4 Ω	Résistance rotor / rotor resistance	R_r	1.5122 Ω	Réactance stator / stator reactance	X_s	1.343 Ω	Réactance rotor / rotor reactance	X_r	4.312 Ω	Réactance de magnétisation / magnetising reactance	X_m	45.498 Ω	FEM / EMF	E	207.1 V	Glissement / Slip	g	5.10 %
	Résistance stator / stator resistance	R_s	2.2881 Ω																						
	Résistance pertes fer / iron losses resistance	R_f	599.4 Ω																						
	Résistance rotor / rotor resistance	R_r	1.5122 Ω																						
	Réactance stator / stator reactance	X_s	1.343 Ω																						
	Réactance rotor / rotor reactance	X_r	4.312 Ω																						
	Réactance de magnétisation / magnetising reactance	X_m	45.498 Ω																						
	FEM / EMF	E	207.1 V																						
	Glissement / Slip	g	5.10 %																						

Annexe 2: Bilan des éléments de compensation d'énergie réactive présents sur le RI

Emplacement des compensations	local	global	Paramètres (450VAC)
Tête de réseau		Oui	C=30uF (+/-20%)
CH1	Oui		C=15uF (+/-20%)
CH3	Oui		C=15uF (+/-20%)
CH4	Oui		C=15uF (+/-20%)
Compensateur synchrone (ALTI)	Oui		0<Iexcitation<8A

BIBLIOGRAPHIE

- [1]C.Prévé et R. Jeannot, « Guide de conception des réseaux électriques industriels », Rapport technique, vol. 6, n° 883, p. 427, 1997.
- [2]J.REPERANT, « Réseaux électriques industriels: Introduction », Techniques de l'ingénieur. Génie électrique, vol. 11, n° D5020, p. D5020–1, 2001.
- [3]G.VALLA, « μ -réseau électrique reconfigurable pour la nouvelle plate-forme d'enseignement et de recherche sur les énergies distribuées »,2006.
- [4]C.RIGONI, « Conception des réseaux électriques de la plateforme PREDIS »,2007
- [5]H.Mabboux, « Alimentations statiques sans interruption (ASI) », Techniques de l'Ingénieur, D, vol. 5, p. 185, 2001.
- [6]M.-C. Alvarez-Herault et al., « An Original Smart-Grids Test Bed to Teach Feeder Automation Functions in a Distribution Grid », IEEE Transactions on Power Systems, 2017.
- [7]P Tixador, « Energie Electrique 1^e année », Polycopié de cours pour les étudiants de 1A de l'ENSE3.

Glossaire :

<i>G2Elab :</i>	<i>Laboratoire de Génie Electrique de Grenoble,</i>
<i>ENSE3 :</i>	<i>Ecole Nationale Supérieure Energie Eau Environnement</i>
<i>PREDIS :</i>	<i>Production et Réseaux d'Energie DISTribuée</i>
<i>RI :</i>	<i>Réseau Industriel</i>
<i>SCADA :</i>	<i>System Control And Data Acquisition</i>
<i>TCP/IP :</i>	<i>Transmission Control Protocol/Internet Protocol</i>
<i>CHn :</i>	<i>Charge n</i>
<i>SCHn :</i>	<i>Simulateur Charge n (permet d'imposer un couple aux CHn).</i>
<i>ALT1 :</i>	<i>Alternateur 1</i>
<i>SALT1 :</i>	<i>Simulateur ALT1 (permet d'entraîner l'alternateur sur un circuit d'alimentation indépendant)</i>
<i>ASI :</i>	<i>Alimentation Sans interruptions</i>
<i>MAS :</i>	<i>Machine asynchrone</i>
<i>MCC :</i>	<i>Machine à courant continu</i>
<i>MS :</i>	<i>Machine synchrone</i>
<i>PcVue :</i>	<i>Logiciel de supervision pilotant le réseau industriel</i>
<i>BT :</i>	<i>Basse Tension</i>
<i>DC/AC :</i>	<i>Continu/ Alternatif</i>
<i>AC/AC :</i>	<i>Alternatif/Alternatif</i>
<i>TOR :</i>	<i>Tout Ou Rien</i>
<i>IHM :</i>	<i>Interface Homme Machine</i>
<i>TP :</i>	<i>Travaux pratiques</i>
<i>Pm :</i>	<i>Puissance mécanique</i>
<i>Pe :</i>	<i>Puissance électrique</i>
<i>PFC :</i>	<i>Power factor correction</i>
<i>API :</i>	<i>Automate Programmable Industriel</i>
<i>INES :</i>	<i>Institut National de l'Energie Solaire</i>
<i>INSA :</i>	<i>Institut National des Sciences Appliquées</i>
<i>PME :</i>	<i>Petites et Moyennes Entreprises</i>
<i>PHIL :</i>	<i>Power Hardware In the Loop</i>
<i>BMS :</i>	<i>Battery Management System</i>
<i>IEE :</i>	<i>Ingénierie de l'Energie Electrique</i>

Commande en temps réel d'un onduleur monophasé connecté à un réseau sous Labview

L. BENBAOUCHE¹, F. KRIM², R. GOMA³

1. Laboratoire d'électricité ESTP, 28 avenue du Président Wilson, 94234 CACHAN, France.
2. Laboratoire d'électronique de puissance université de Sétif Algérie
3. L2ASD, CNU 61 63, Département GEII, Université Paris 13, 99 Avenue Jean Baptiste Clément, 93430 Villetaneuse, France

Résumé : Dans cet article nous proposons la commande en temps réel d'un onduleur monophasé connecté au réseau, flexible et efficace. La première étape est consacrée à l'étude et la conception de l'appareil de commande grâce à la simulation, réalisée par le logiciel Labview, sur l'ordinateur « hôte ». La seconde étape est l'exécution de l'application à partir de PXI « cible ».

Le logiciel Labview, combiné avec NI-DAQmx, nous donne les outils nécessaires pour construire facilement des applications utilisant les convertisseurs numériques analogiques pour générer les signaux de commande PWM. Les résultats expérimentaux obtenus montrent l'efficacité du logiciel Labview appliqué à l'électronique de puissance.

Mots-clés : Commande en temps réel, Labview, onduleur, PWM.

1. Introduction

Pour vérifier le bon fonctionnement de l'onduleur monophasé connecté au réseau en temps réel et la qualité d'un onduleur qui est mesurée en termes de rendement, de stabilité en fréquence, de temps de réponse suite à des changements brusques de la charge et de taux d'harmoniques sous des charges, il est nécessaire de concevoir un appareil de commande adapté à différentes méthodes de commande. La technique de modulation de largeur d'impulsions est principalement utilisée comme exemple.

Les harmoniques à éliminer nécessitent le calcul des angles de commutations qui sont déterminés grâce à la méthode [3] et permettent de réaliser le modèle des impulsions numériques de commande.

Le train d'impulsions numériques qui constituent un signal PWM a une fréquence et amplitude variable.

Pour le fonctionnement de l'organe de commande (appareil de commande + onduleur) une boucle à verrouillage de phase s'avère utile. Cette dernière peut générer un signal de synchronisation (synchrone avec la tension du réseau) et un signal d'horloge qui a pour fréquence un multiple de la fréquence du réseau.

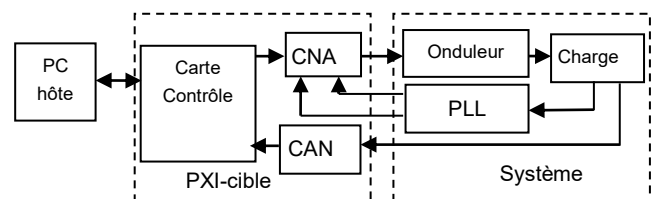
Le logiciel Labview permet d'une part de calculer des angles de commutations, de générer les impulsions de commande des différents interrupteurs de l'onduleur et la gestion de la commande en temps réel, et d'autre part de simuler le modèle pour l'étude du fonctionnement d'un onduleur monophasé connecté au réseau électrique.

Grâce à l'environnement de développement graphique de Labview, combiné avec NI-DAQmx, on obtient des outils nécessaires pour construire facilement des applications utilisant des virtuels instrumentation (VI) de calcul, conversion en binaires, simulation et programmation des lignes de sorties analogiques pour générer les signaux de commande de l'onduleur réel.

La configuration de la commande est constituée essentiellement d'un ordinateur hôte, d'un PXIcible (système d'instrumentation modulaire) et d'un onduleur monophasé connecté à une charge (RL, RL et réseau ou moteur alternatif avec la variation du rapport tension-fréquence).

2. Principe de la commande

L'ordinateur « hôte » permet d'une part, grâce à la simulation, l'étude du comportement physique du système et de l'appareil de commande en utilisant le logiciel Labview et d'autre part de l'envoyer vers PXI qui pilote l'onduleur. La communication en série se fait entre le PC hôte et le PXI cible.



Ordinateur hôte : PC exécutant Labview sous Windows.

PXI cible : carte de contrôle, carte de conversion numérique-analogique et analogique-numérique

Système : onduleur, charge et boucle à verrouillage de phase (PLL).

Figure 1 : schéma synoptique de la commande

3. Appareil de commande

3.1. Signaux de commande

La technique de la PWM de type numérique, consiste à calculer les instants de commutations des transistors de manière à répondre à certains critères portant sur le spectre fréquentiel du signal résultant. Ces séquences (s, \bar{s}) sont mémorisées dans des tableaux de 4096 bits et restituées cycliquement pour assurer la commande des transistors.

A l'aide de la figure 2, on montre la relation entre la tension du circuit intermédiaire U_c et la tension de sortie de l'onduleur, ainsi que les transistors et les diodes de roue libre qui sont remplacés par des interrupteurs électronique parfaits.

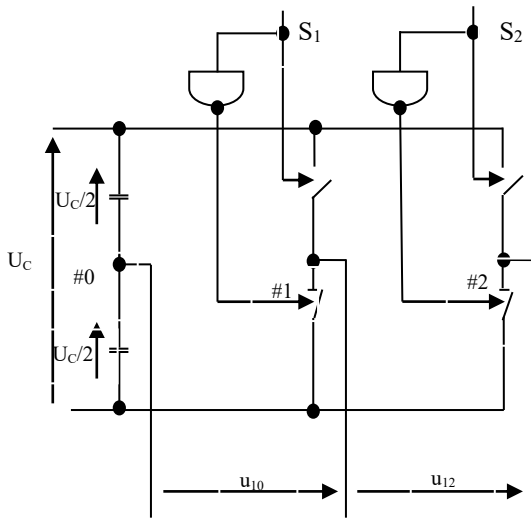


Figure 2 : Onduleur monophasé avec interrupteurs électroniques parfaits

Le lien entre les tensions est :

$$\begin{aligned} u_{k0} &= \frac{1}{2} U_c \text{ pour } s_k = 1 ; \bar{s}_k = 0 \\ u_{k0} &= -\frac{1}{2} U_c \text{ pour } s_k = 0 ; \bar{s}_k = 1 \\ u_{k0} &= \frac{1}{2} U_c (s_k - \bar{s}_k) \\ k &= 1, 2 \end{aligned} \quad (1)$$

La fonction de commutation est définie par la relation suivante

$$m_k = s_k - \bar{s}_k \quad (2)$$

a) Commande symétrique :

La fonction de commutation s'exprime sous la forme d'une série de Fourier :

$$m_k = \sum_{n=1}^{\infty} a_n \sin(n\omega t)$$

Avec les coefficients a_n de la fonction m_k et les angles de commutations α_i exigent la relation suivante:

$$a_n = \frac{4}{n\pi} \left\{ 1 + 2 \sum_{i=1}^j (-1)^i \cos(n\alpha_i) \right\} \quad (3)$$

b) Commande décalée :

La fonction de commutations s'exprime sous la forme d'une série de Fourier :

$$m_k = \sum_{n=1}^{\infty} c_n \sin(n(\omega t + \theta))$$

Avec les coefficients c_n de la fonction m_k et les angles de commutations α_i exigent les relations suivantes

$$c_n = \frac{4}{n\pi} \left\{ 1 + 2 \sum_{i=1}^j (-1)^i \cos(n\alpha_i) \right\} \cos n\left(\frac{\theta}{2}\right) \quad (4)$$

Le fondamental de l'amplitude peut varier de $c_{1\min}=0$ pour $\theta = \pi$ jusqu'à $c_{1\max}$ pour $\theta = 0$.

avec

j : nombre d'angles de commutations par quart de période.

α_i : angles de commutations avec la condition que

$$\alpha_1 \{ \alpha_2 < \alpha_3 < \dots < \alpha_{j-1} < \alpha_j < 90^\circ \} \quad (5)$$

3.2. Calcul des angles de commutations et formation du modèle d'impulsions

Grâce à un VI (Virtual instrumentation) du logiciel Labview, on résout le système d'équations non linéaires où son algorithme utilisé est de nature fondamentalement stochastique [3].

Si la condition (5) est vérifiée, les valeurs numériques des angles commutations peuvent être convertis en binaires ($2^{12} = 4096$ bits) pour former les signaux de commandes et les mémoriser dans des tableaux.

Les étapes du programme de calcul des impulsions de commande permettant d'éliminer les harmoniques souhaitées sont données ci-dessous :

- 1) Détermination des angles de commutations (boucle while).
- 2) Détermination de la correspondance des angles de commutations en binaires (boucle choix).
- 3) Conversion et formation du modèle des impulsions de commande en binaire (registres de décalage et MathScript RT).
- 4) Détermination de la correspondance de l'angle de décalage en binaires.
- 5) Réalisation des signaux de commande et visualisation.

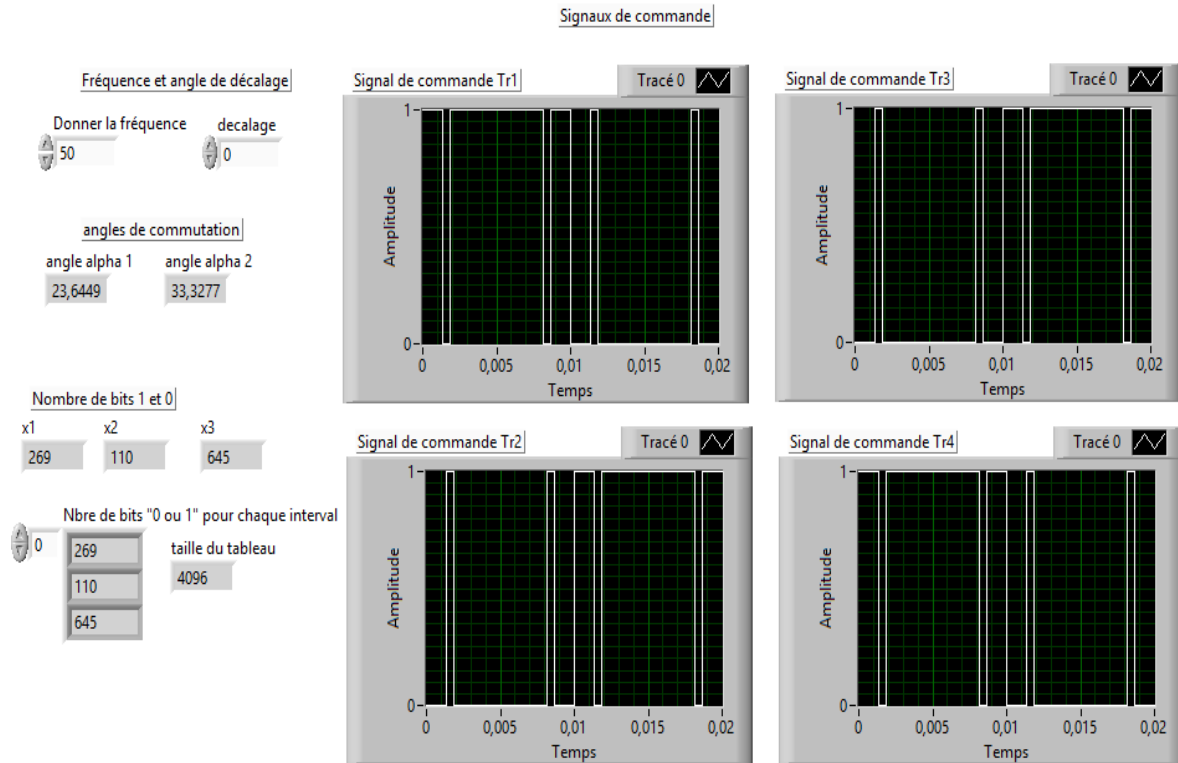


Figure 3 : « Face avant » Signaux de commande, 2 angles de commutations et nombre de bits

La figure 3 correspond à la face avant de l'appareil de commande PWM et illustre les signaux de commande obtenus pour l'élimination des harmoniques 3 et 5.

4. Modèle mathématique et simulation de l'onduleur et la charge

4.1. Modèle mathématique d'un onduleur monophasé

La figure 4, représente la connexion d'un onduleur monophasé à un réseau. Elle nous permet d'en déduire le modèle mathématique d'un onduleur monophasé à commande symétrique ou décalée.

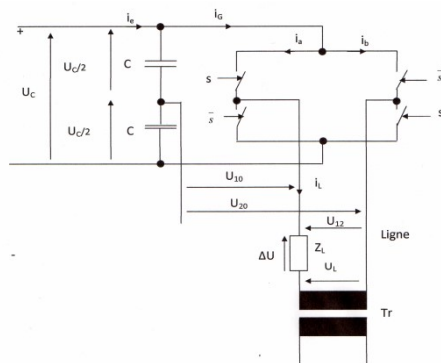


Figure 4 : schéma d'un onduleur monophasé

4.1.1. Tension de sortie de l'onduleur u_{12} et courant i_G

A l'aide de la figure 4, nous illustrons les relations entre la tension d'entrée u_c et la tension de sortie de l'onduleur u_{12} ainsi la relation entre le courant de ligne i_L et le courant i_G . Le transistor et la diode sont remplacés par un interrupteur idéal.

La tension u_{10} :

$$\begin{aligned}
 u_{10} &= \frac{1}{2} u_c && \text{pour } s = 1 \bar{s} = 0 \\
 u_{10} &= -\frac{1}{2} u_c && \text{pour } s = 0 \bar{s} = 1 \\
 u_{10} &= \frac{1}{2} u_c (s - \bar{s}) && (6)
 \end{aligned}$$

La tension u_{20} :

$$\begin{aligned}
 u_{20} &= -\frac{1}{2} u_c && \text{pour } s = 1 \bar{s} = 0 \\
 u_{20} &= \frac{1}{2} u_c && \text{pour } s = 0 \bar{s} = 1 \\
 u_{20} &= -\frac{1}{2} u_c (s - \bar{s}) && (7)
 \end{aligned}$$

La tension u_{12} :

$$u_{12} = u_c (s - \bar{s}) = u_c m \quad (8)$$

Le courant i_G est :

$$i_G = \frac{1}{2} i_L (s - \bar{s}) = \frac{1}{2} i_L m \quad (9)$$

Modèle mathématique de la charge

La variable d'état est le courant de ligne i_L qui est décrit par l'équation différentielle suivante :

$$\frac{di_L}{dt} = -\frac{R}{L}i + \frac{1}{L}(u_{12} - u_L) \quad ; \quad i_{L0} \quad (10)$$

4.1.2. Simulation de la charge

$$i(t_1) = i(t_0 + \Delta t) = i(t_0) + \int_{t_0}^{t_0 + \Delta t} \frac{di}{dt} dt = i(t_0) + \frac{di}{dt}(t_0) \cdot \Delta t \quad (11)$$

La figure 5 représente la résolution de l'équation (10) obtenue à l'aide du logiciel Labview tandis que la figure 6 correspond à la face avant de la commande en temps réel de l'onduleur sous labview contenant des entrées et de sorties du programme.

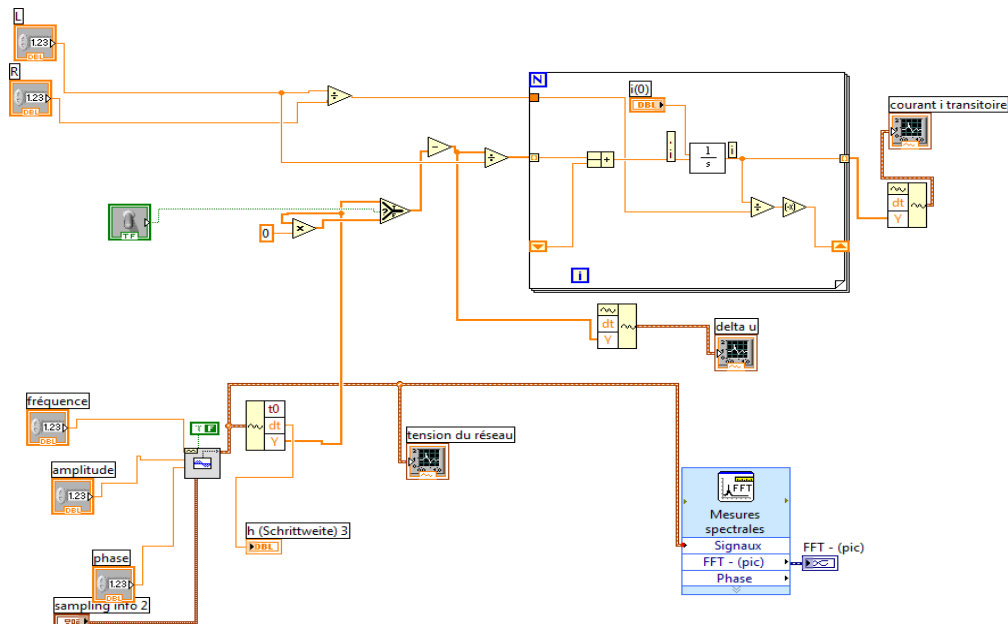


Figure 5 : Simulation de la charge.

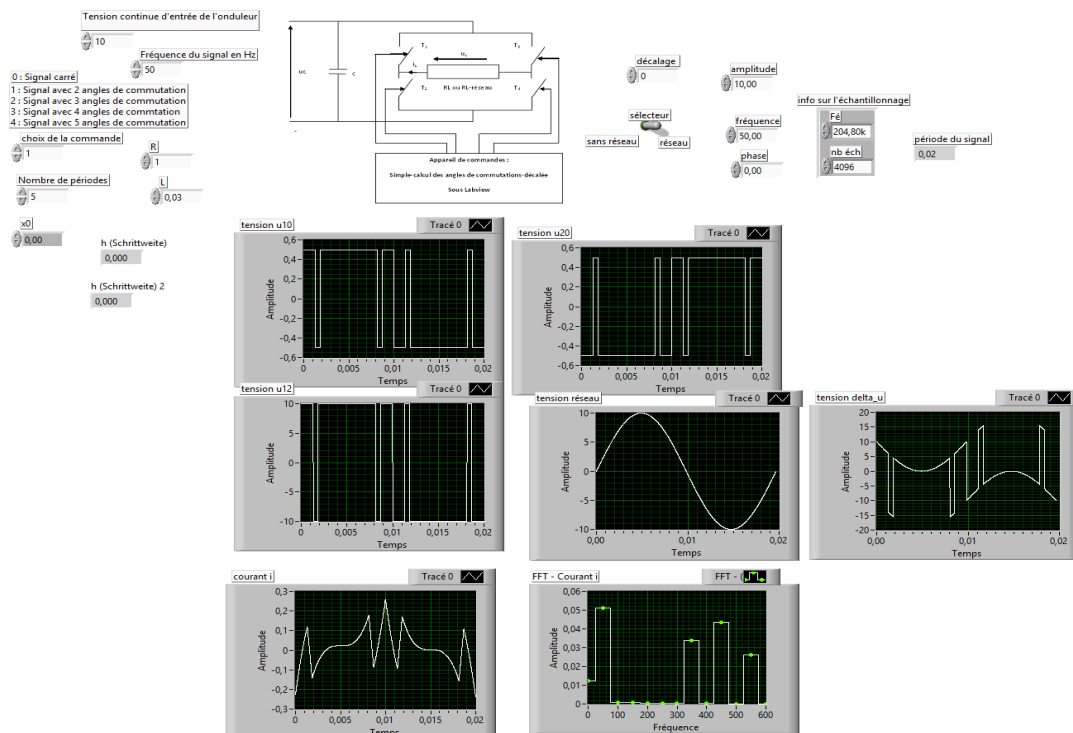


Figure 6 : « Face avant » de la commande en temps réel de l'onduleur sous labview.

5. Système réel

La configuration matérielle de la commande proposée est constituée essentiellement d'un ordinateur hôte, d'un PXI cible et d'un système qui est constitué d'un onduleur monophasé, d'une charge qui se compose d'une résistance-inductance et d'un réseau électrique et d'une boucle à verrouillage de phase (PLL).

Le système réel est représenté par la figure suivante :

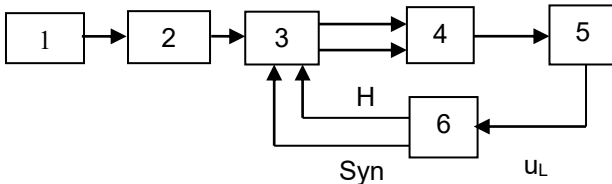


Figure 7 : Le système réel

- 1. Ordinateur
- 2. PXI
- 3. Carte NI-DAQmx
- 4. Onduleur monophasé
- 5. Charge
- 6. Boucle à verrouillage de phase (PLL)

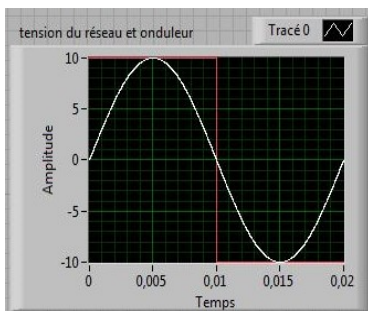
L'application de l'appareil de commande se fait grâce à un menu et peut générer les deux types de commandes (symétrique et décalée).

6. Résultats et interprétations

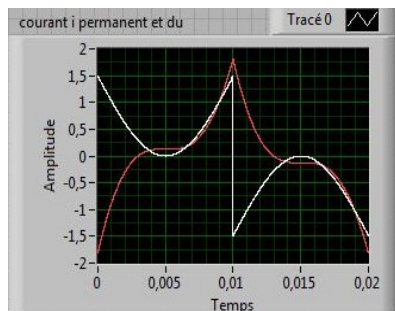
Après exécution de l'application, la comparaison du système réel avec celle obtenue par simulation montre l'efficacité de l'algorithme appliqué.

6.1. Commande symétrique sans angle de commutation :

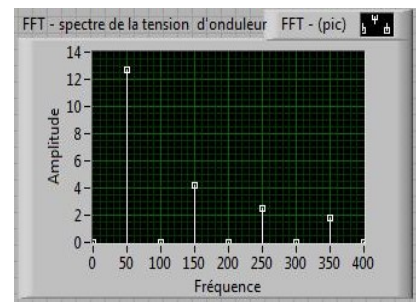
a) Simulation



1. tensions du réseau et sortie de l'onduleur



2. Tension aux bornes de $Z_L \Delta u$ et le courant de ligne i_L .



3 Spectre fréquentiels des harmoniques

Figure 8 : résultats de la simulation

La figure 8.3 montre que la tension de sortie de l'onduleur contient toutes les harmoniques impaires

Les figures 8 et 9 montrent que les tensions de sortie de l'onduleur, du réseau et celle aux bornes de l'impédance de la ligne sont semblables.

b) Système réel

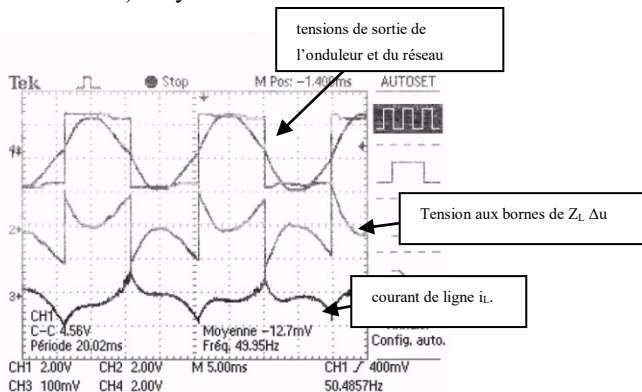
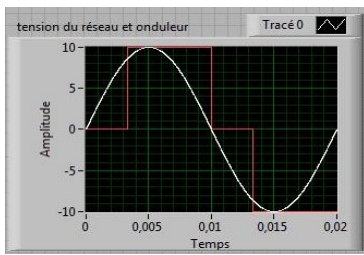


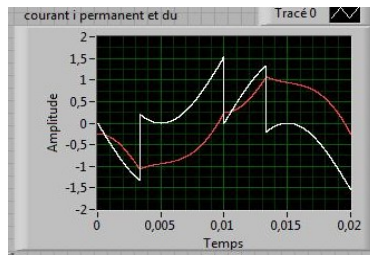
Figure 9 : résultats du système réel

6.2. Commande décalée avec $\theta = 60^\circ$

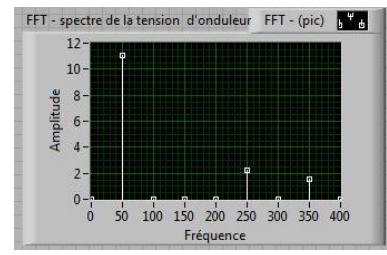
a) Simulation



1. tensions du réseau et sortie de l'onduleur



2. Tension aux bornes de $Z_L \Delta u$ et le courant de ligne i_L



3. Spectre fréquentiels des harmoniques

Figure 10 : résultats de la simulation

La figure 10.3 montre que l'harmonique 3 de la tension de sortie est éliminée.

Les figures 10 et 11 montrent que les tensions de sortie de l'onduleur, du réseau et celle aux bornes de l'impédance de la ligne sont semblables.

c) Système réel

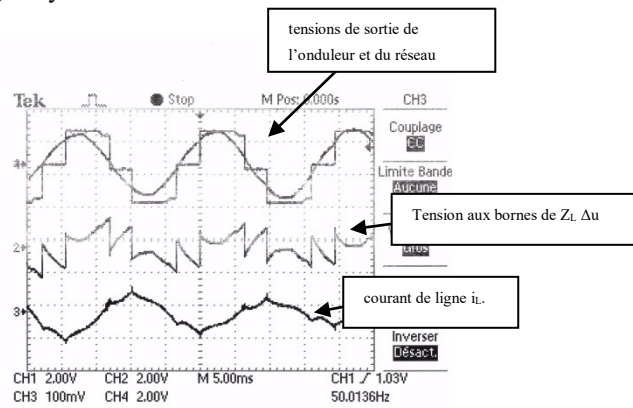
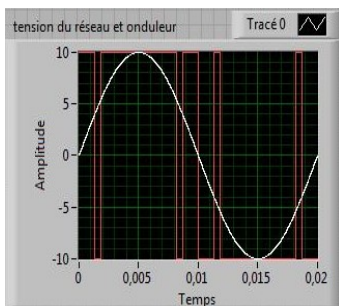


Figure 11 : résultats du système réel

6.3. Commande symétrique avec angles de commutations $\alpha_1 = 23,64^\circ$ et $\alpha_2 = 33,33^\circ$

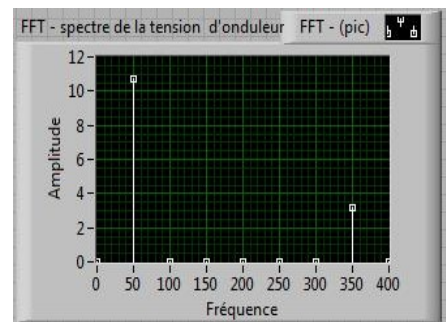
a) Simulation



1 tensions du réseau et sortie de l'onduleur



2 Tension aux bornes de $Z_L \Delta u$ et le courant de ligne i_L



3 Spectre fréquentiels des harmoniques

Figure 12 : résultats de la simulation

La figure 12.3 montre la tension de sortie de l'onduleur où les harmoniques 3 et 5 sont éliminées.

b) Système réel

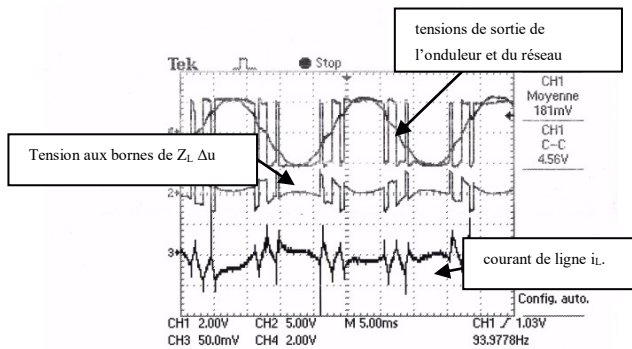


Figure 13 : résultats du système réel

Les figures 12 et 13 montrent que les tensions de sortie de l'onduleur, du réseau et celle aux bornes de l'impédance de la ligne sont semblables.

7. Conclusion

Les résultats obtenus permettent de valider les algorithmes de commandes et l'utilisation du logiciel Labview confère une interactivité et une flexibilité dans la commande en temps réel.

En plus, l'appareil de commande peut être utilisé pour piloter aussi un onduleur monophasé connecté à un moteur asynchrone monophasé en variant la fréquence et la tension de commande.

8. Remerciements

Nous tenons à remercier Monsieur KASTELL pour ses précieux conseils et à souhaiter à Monsieur Hé une bonne retraite et pour ce nouveau départ profite-en bien.

9. Bibliographies

[1] H.S.PATEL and R.G.HOFT
Generalized techniques of harmonic elimination and voltage control in thyristors inverters.
Part I. harmonic elimination. IEEE Trans. Ind. Appl.
Vol. IA-9, May/June 1973.

[2] LabVIEW version 8.2
Application de l'instrument virtuel (VI) : Solution du système non linéaire.

[3] Wolfgang Georgi and Ergun Metin
Einführung in LabVIEW, 2009 Carl
HanserVerlagMünchen

Fiabilité d'éléments d'accumulateurs Lithium 18650 (mise en étude)

Arnaud Sivert*, Bruno Vacossin*, Franck Betin*,

*Laboratoire des Technologies Innovantes (L.T.I), équipe Énergie Électrique et Systèmes Associés (EESA)
U.P.J.V Université de Picardie Jules Verne, Institut Universitaire de Technologie de l'Aisne GEII, 02880 SOISSONS.

Résumé : Cet article présente une étude statistique sur la durée de vie de batteries lithium. Le tableur Excel est utilisé et permet de répondre aux questions : Quelle est la loi de probabilité la plus adaptée pour connaître la durée de vie des batteries ? Quelles sont les disparités entre les éléments d'un même fabricant (notamment en ce qui concerne la SOH, State Of Health, l'état de santé ou résistance interne) ?

L'objectif est qu'un étudiant de deuxième année de formation universitaire (en Institut Universitaire de Technologie, IUT, par exemple) puisse mettre en place une étude statistique de terrain, en entreprise, à partir d'un exemple concret et simplifié.

Cet article démontre aussi que les études de statistiques sur les batteries sont difficiles à effectuer hors période de garantie car il n'est souvent pas en effet rentable de faire la réparation d'un accumulateur. La maintenance est difficile à entreprendre sur ces accumulateurs et son coût est élevé. De plus, la chimie des cellules s'améliore régulièrement et par conséquent, les statistiques obtenues pour des éléments vendus il y a plus de 2 ans ne sont plus valables aujourd'hui. Enfin, cet article montre qu'il est souvent possible de donner un second souffle aux cellules de ces batteries.

1. Introduction

La durée de vie des batteries est un élément essentiel pour connaître le coût d'une installation en fonction de son utilisation. Cette durée de vie dépend de leur composition chimique, de la qualité de leur fabrication mais aussi du nombre prévisionnel de cycles de charge et de décharge, de la profondeur de décharge, DOD (Depth Of Discharge), du taux de décharge et de charge (C rate), de l'effet calendaire (vieillesse) et de la température de l'environnement d'utilisation ...

De nombreux articles scientifiques ont démontré que pour un même lot d'éléments sortant de la même chaîne de production, la durée de vie dépendait aussi d'une loi de probabilité [1, 2, 3, 4].

Etant donné qu'il y a souvent un grand nombre de cellules mises en série dans une batterie. La fiabilité de l'ensemble de celles-ci peut être faible. Les cellules li-ion NMC 18650 (18×65mm), de 3 à 4€, 42g, 2,5 A.h, 3,7 V, 3C en décharge et 1C en charge sont les éléments les plus vendus à l'heure actuelle. Les applications sont très variées et vont de la perceuse sans fil (18 V, 5 A.h, 75€, 5S2P et

donc de 10 cellules dont 5 en séries et 2 en parallèles), en passant par le vélo électrique (48 V, 20 A.h, 800 €, 13S8P et donc 104 cellules), jusqu'à une voiture comme la Tesla S (400 V, 85 KW.h, 22 k€, 96S74P et donc 7104 éléments, vendue avec une certaine marge à 60 k€).

Malheureusement, ni les datasheets des fabricants de cellules [6,7], ni les bigdatas des équipements portatifs autonomes fournissent des statistiques sur la fin de vie des batteries.

Les étudiants d'IUT en génie électrique, en maintenance industrielle, en qualité industrielle, ont des stages industriels à effectuer durant leur formation. Ces périodes en entreprise les conduisent parfois à entreprendre des études de fiabilité sur les batteries pour organiser une maintenance préventive ou pour mettre en place une garantie client.

Un certain nombre de questions se posent alors auxquels cet article va chercher à répondre : **le défaut est-il aléatoire avec une faible probabilité d'apparition ou un signe indiquant que tous les éléments risquent d'être mis en défaut ? Faudra-t-il faire un rappel de produits à cause d'un lot de cellules mal réalisées ? Quels sont les outils qui permettent la mise en œuvre d'études simples de probabilité ? Quelle est la loi de probabilité la plus**

adaptée pour connaître la fiabilité des batteries ? Quelle est la configuration des éléments ou comment est conçue la modularité d'un accumulateur ? Quelles sont les disparités entre les éléments d'un même fabricant (SOH, résistance interne en fonction du nombre de cycles) ?

Seules les cellules LiNMC des boîtiers 18650 qui sont commercialisées couramment depuis 2010 seront prises en compte dans cet article.

Si le boîtier est identique, toutes les batteries ne se valent pas et un même fabricant peut vendre 3 ou 4 modèles différents en fonction des besoins du marché. Depuis 2012, un site teste et compare les différents éléments 18650 [5].

De nouvelles questions se posent alors : quels sont les éléments du modèle qui varie en fonction du cyclage ? Comment établir la fiabilité d'une batterie à partir des retours de garanties ou des travaux de maintenance d'un véhicule électrique ? Est ce qu'il est rentable de faire la réparation d'un accumulateur en fonction du coût de la main d'œuvre et du prix des batteries ? Cet article tente, là encore, de répondre à ces interrogations.

2. Modèle électrique d'une cellule

L'élément électrochimique peut être modélisé simplement par le modèle électrique suivant [8]:

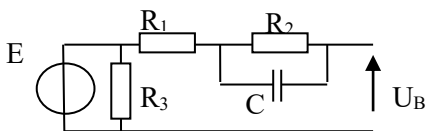


fig 3: Modèle électrique simplifié d'un élément de batterie

Lors d'une impulsion de courant de décharge la tension de l'élément correspondra à l'équation suivante :

$$U_e(t) = E - R_1 \cdot I - R_2 \cdot I \cdot (1 - e^{-\frac{t}{R_2 \cdot C}}) \quad (1)$$

La tension électrochimique E (varie entre de 4.2 V à 3 V en fonction du SOC) et la valeur de la résistance ($R_1 + R_2$) (30 mΩ à 50 mΩ.) dépend de la température et la profondeur de décharge.

La résistance d'autodécharge R_3 à une très grande valeur ohmique. Une batterie li-ion peut donc être stockée pendant plus d'un an en ne perdant seulement qu'une dizaine de pourcents de sa capacité énergétique nominale. Cependant, après

un certain nombre de cyclages, cette résistance peut ne plus être négligeable.

Lorsque la cellule a subi un certain nombre de charges et de décharges, la capacité énergétique diminue presque linéairement et la résistance interne augmente (de 150 % pour 300 cycles). Cette augmentation de résistance ne provoque pas un échauffement problématique de la cellule et cela même pour des courants de décharge de 3C.

La température à ne pas dépasser est d'environ 50°C. Pour le boîtier 18650, la résistance thermique est d'environ 15°C/W en fonction de l'espace entre les éléments, avec une capacité thermique de 60 J/°C.

Lorsque le SOH atteint 80% de la capacité d'origine ou lorsque la résistance interne dépasse 2 fois la résistance nominale alors l'accumulateur est souvent défini comme déficient car la valeur de la pente du SOH en fonction du cyclage va brutalement doubler (il en est de même pour celle de la résistance).

Le BMS (Battery Management Security) coupera alors l'alimentation de l'élément le plus faible (en fonction de la disparité des résistances ou de l'évolution du SOH).

Mais comment est réellement configurée une batterie ?

3. Configuration d'une batterie et BMS

La mise en série des cellules permet d'obtenir plus d'énergie embarquée en additionnant les tensions des éléments et donne la tension désirée au niveau du convertisseur électrique. En revanche, la mise en parallèle de cellules de batterie permet d'avoir une intensité disponible plus importante, avec un courant de décharge par élément acceptable. L'assemblage en parallèle permet la réduction de l'impédance équivalente en prenant en compte le nombre de branches en parallèle. La configuration parallèle permet de diminuer la résistance équivalente comparée au cumul des effets résistifs de l'assemblage en série.

A ce jour, il existe de nombreux boîtiers de batterie qui permettent d'avoir des capacités énergétiques plus grandes pour ne pas mettre d'éléments en parallèle [14] tel que les 26650 5 A.h, 32650 6 A.h. Cela se retrouve aussi pour les boîtiers « en format poche » où l'on a toutes les possibilités de quelques A.h à 700 A.h.

Plus la capacité énergétique est grande, plus la surface et plus l'épaisseur de la cellule est grande. Dans ce cas, la résistance interne, sera plus faible.

Le problème de la mise en parallèle de cellules de résistance interne différente (même avec de faibles écarts) pour des taux de décharge de plus de 1C est qu'il y aura une distributivité des courants et des températures différentes entre les cellules [8, 9].

Cette hétérogénéité des courants au niveau de chaque cellule en parallèle n'est pas mesurée par le BMS.

Par ailleurs, un écart de seulement 20% (de la valeur des courants) peut entraîner une diminution de la durée de vie (diminution de 40% du nombre de cycles) par rapport à une configuration comprenant deux cellules en parallèles connectées possédant une résistance interne identique [10].

La mise en parallèle de cellules conduit donc à avoir une certaine hétérogénéité du boîtier par rapport à la disparité des valeurs ohmiques (R_1 et R_2). De plus, une cellule qui a une résistance d'autodécharge importante provoquera une décharge des autres cellules en parallèle.

Si l'utilisation de l'accumulateur est journalière, l'équilibrage des éléments de la charge se fera. Mais si l'accumulateur n'est pas souvent utilisé, alors la cellule qui a une autodécharge importante videra entièrement l'énergie des éléments en parallèle jusqu'à atteindre 0 V (ce qui détruira tous ces éléments en parallèle).

De même, certains BMS ne voudront pas recharger une batterie dès qu'elle a une seule tension d'un élément inférieure à 2,5 V. Dans ce cas, il faudra recharger unitairement cet élément.

Certains BMS bluetooth (40 €, 13S, 60 A, équilibrage dissipatif 0,05 A) [12] envoient des notifications sur une supervision ou sur smartphone lorsqu'un certain seuil critique de charge est atteint. Ils recommandent alors de remettre en charge l'accumulateur.

La difficulté pour un équilibreur dissipatif est d'être synchronisée avec le courant du chargeur. En effet, si le courant du chargeur est trop important par rapport au courant admissible par l'équilibreur alors l'équilibrage ne se fait pas car la température admissible de ses résistances va être atteinte en quelques minutes.

L'article [1] prouve qu'il n'est pas possible de faire une sélection de cellules de batterie à la sortie du procédé de fabrication pour sélectionner des éléments qui aurait d'excellentes caractéristiques et une durée de vie très importante. La durée de vie est donc aléatoire.

4. Loi de probabilité et durée de vie

Il existe de nombreuses méthodes pour essayer de faire une prédiction de la durée de vie d'une batterie (par modèle du circuit équivalent, analytique, extrapolation linéaire, statistique, corrélation) [16].

Cet article va juste présenter une étude statistique qui s'appuie sur des retours d'accumulateur et pour laquelle, il est possible de définir un écart type, une variance et ainsi calculer les probabilités de défaillance.

Les outils sont nombreux pour faire des études de probabilité, calculatrice, logiciel Mathcad, Matlab, tableur, ...

Pour une utilisation industrielle où les données de défaillance peuvent être prises en temps réel par date, l'utilisation du tableur Excel est plus aisée pour extraire des données. De plus, de nombreuses données peuvent être traitées comme dans la thèse [16]. Les étudiants en DUT GEII (Génie Electrique et Informatique Industrielle) et GIM (Génie Industriel et Maintenance) n'ont pas ou peu eu de formations sur Excel et ont donc du mal à appliquer les données de la littérature [17]. En revanche, les TC (Techniques de Commercialisation), les GACO (Gestion Administrative et Commerciale) utilisent fortement ce tableur. Par conséquent, quelques formules de ce tableur seront présentées pour que les étudiants aient une première base (avec un exemple de 30 cellules). On peut télécharger le fichier Excel [11] pour mieux appréhender cet outil.

La fonction statistique, **NB.SI (plage, critère)**, permet de compter le nombre de cellules qui répondent à une plage de défaillance.

A partir d'essais de cyclabilité et avec une plage de 25, l'histogramme du nombre de cellules qui a atteint 80% de la capacité nominale est représenté sur la figure suivante :

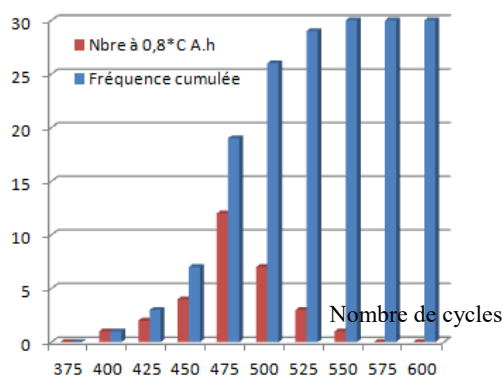


fig 1: Histogramme du nombre de défaillances d'un élément 18650 avec la fréquence cumulée des nombres de défaillances.

Le taux de défaillances des cellules renseigne sur le comportement de l'accumulateur à être en défaut. Le taux de défaillance peut être déterminé pour chaque plage d'étude (25 cycles pour notre exemple) à partir de la fonction survie notée R (Reliability) correspond à l'équation suivante (2) :

$$\lambda(t) = \frac{-1}{R} \cdot \frac{dR}{dt} = \frac{1}{nbr\ d'\ element} \cdot \frac{nbr\ défaut\ de\ la\ plage}{plage} = \frac{-d(\ln(R))}{dt}$$

Sur la figure 1, le nombre de défaillances en rouge ayant une grande variation en fonction du nombre de cycles, le temps moyen entre pannes MTBF (Mean Time Between Failures $MTBF=1/\lambda_{moyen}$ sur une plage) est insuffisant pour faire une estimation de probabilité de défaillances précises dans notre cas.

La répartition des nombres de défaillances étant proche d'une courbe « gaussienne », la loi normale sera choisie. Cette loi dépend de 2 variables : le cycle moyen μ (surnommé l'espérance) et l'écart type σ avec une densité de probabilités correspondant à l'équation suivante :

$$Densité\ Proba(t) = \frac{1}{\sigma\sqrt{2\pi}} e^{-\frac{1}{2}\cdot(\frac{t-\mu}{\sigma})^2} \quad (3)$$

La probabilité de défaillances correspond à l'intégration de la densité mais ne peut pas être résolue algébriquement et Excel n'a pas de fonction d'intégration numérique (méthode des trapèzes). En revanche, Excel a la fonction de la loi normale centrée réduite :

$$=LOI.NORMALE.STANDARD(colonne)$$

Donc, dans la colonne valeur, les données suivantes doivent être calculées avec la variable x correspondant à toutes les plages de cycles de la batterie.

$$Colonne = (plage - cyclेमoyen) / \text{écart type} = \frac{x-\mu}{\sigma} = ui \quad (4)$$

Avec un tableur, le cycle moyen des défaillances et l'écart type sont donnés facilement par les fonctions suivantes (5, 6) :

$$Cyclेमoyen = \mu = (\sum (cycle \bullet \text{défaillance})) / nbrmoyend'element$$

$$\text{écart type} = \sigma = \sqrt{\frac{\sum nbrdéfaillance \cdot (plage - cyclेमoyen)^2}{nbrd'element}}$$

Dans le cas de l'histogramme précédent, le cycle moyen est de 479, l'écart type est de 31.6, la courbe de la probabilité d'une défaillance avec la loi normale est pratiquement identique à la

fréquence cumulée comme on peut l'observer sur la figure suivante.

Les différences entre ces 2 courbes viennent du fait que la fréquence cumulée réelle ne correspond pas exactement à une la loi normale. Mais le kurtosis (coefficient d'aplatissement) est proche de 0 car la dispersion est faible.

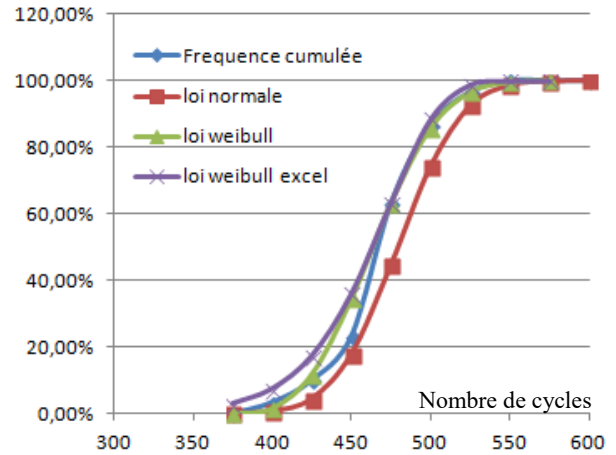


fig 2: Cumuls des nombres de défaillances réelles (courbe bleu) et estimées avec différentes lois de probabilité.

Réciproquement, il est possible de connaître à partir des probabilités le cyclage x en fonction de la valeur moyenne et l'écart type avec la fonction Excel suivante :

$$=LOI.NORMALE.INVERSE(probabilité, moyenne, \text{écart_type})$$

Excel n'a pas de fonction dérivée pour retrouver la densité de probabilité à partir de la loi de probabilité mais l'utilisation de dérivées numériques peut être facilement exploitables comme on peut l'observer sur la figure suivante :

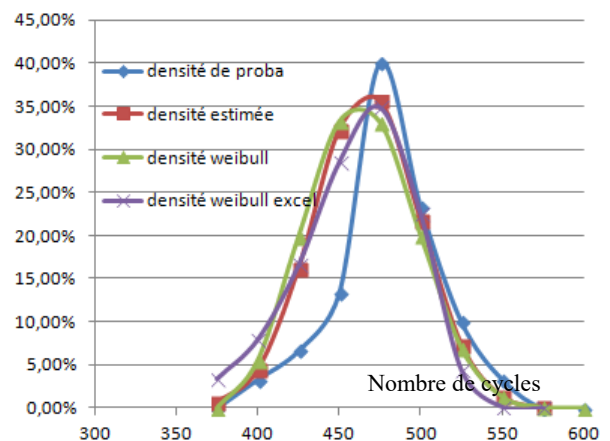


fig 3: Densité de probabilités réelle et estimée avec différentes lois de probabilité.

Maintenant que la loi normale sur Excel a été présentée, la loi de Weibull va être dévoilée car sa

fonction est algébrique contrairement à la loi normale. La fonction sur Excel est la suivante et représente l'équation suivante :

= LOI.WEIBULL(x, α, β, 1)

$$Proba(x) = 1 - e^{-\left(\frac{x-\theta}{\beta}\right)^\alpha} \quad (7)$$

Avec α qui représente le paramètre de forme de la fonction, β le paramètre d'échelle et θ le paramètre de localisation de la distribution par rapport à l'origine.

Il n'y a pas le terme θ dans la fonction Excel mais il est possible de l'introduire en calculant la fonction algébrique dans Excel.

Notons que la valeur de la probabilité sera de 0,63 lorsque x-θ=β.

La densité de probabilité correspond à l'équation suivante :

$$Densité\ Proba(x) = (x-\theta)^{\alpha-1} \cdot \frac{\alpha}{\beta^\alpha} \cdot e^{-\left(\frac{x-\theta}{\beta}\right)^\alpha} \quad (8)$$

Le tableur donne directement la fonction de la densité avec la fonction = LOI.WEIBULL(x, α, β, 0)

A partir de la valeur de la fréquence des défaillances cumulée à 0,63 graphiquement, la valeur β correspond à 475 cycles.

Pour connaître le facteur de forme α, l'équation suivante pourrait être utilisée.

$$\alpha = \ln(-\ln(1 - Proba(x)) / \ln(x/\beta)) \quad (9)$$

Mais avec un seul point, cela ne donne pas correctement le paramètre de forme de la densité de probabilité. La meilleure solution est de tracer la courbe du log népérien de la survie qui correspond à l'équation suivante et d'identifier le coefficient α qui correspond à la pente de la courbe :

$$\ln(-\ln(1 - Proba(x))) = \alpha \cdot \ln(x-\theta) - \alpha \cdot \ln(\beta) \quad (10)$$

α correspond donc à la pente de la courbe précédente ce qui donne l'équation suivante qu'il faut ajuster en fonction des données :

$$\alpha = \frac{\ln(-\ln(1 - Proba(x_2))) - \ln(-\ln(1 - Proba(x_1)))}{\ln(x_2 - \theta) - \ln(x_1 - \theta)} \quad (11)$$

D'ailleurs sur la figure suivante qui représente l'équation 9, on peut observer avec la fréquence cumulée réelle de l'exemple est la fonction de Weibull avec (α=3, θ=375, β=100).

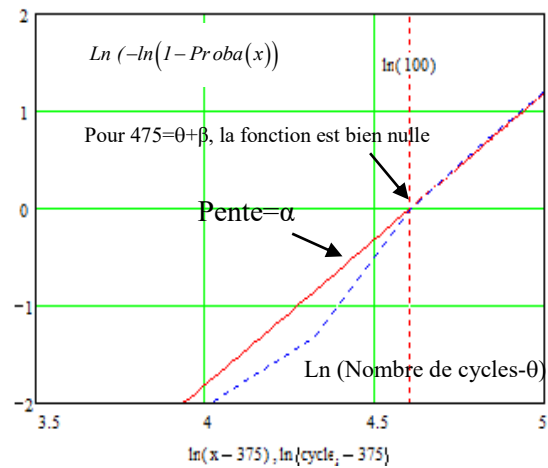


fig 4: Courbe permettant de déterminer le coefficient α et β de la loi Weibull.

Sur le tableau suivant, on peut observer les valeurs dans le tableau Excel qui ont permis de tracer les courbes précédentes.

Pour la loi normale comme pour la loi de Weibull, s'il y a des cellules de batterie mortes bien avant la valeur moyenne alors l'estimation de probabilité ne donnera pas de bons résultats.

Exemple sur 30 cellules, s'il y a une cellule morte au bout de 100 cycles et une autre au bout de 200 cycles avec ensuite toutes les autres cellules qui présentent des défaillances identiques à l'histogramme précédent alors les défaillances cumulée et l'estimation donnera les résultats représentées sur la courbe suivante.

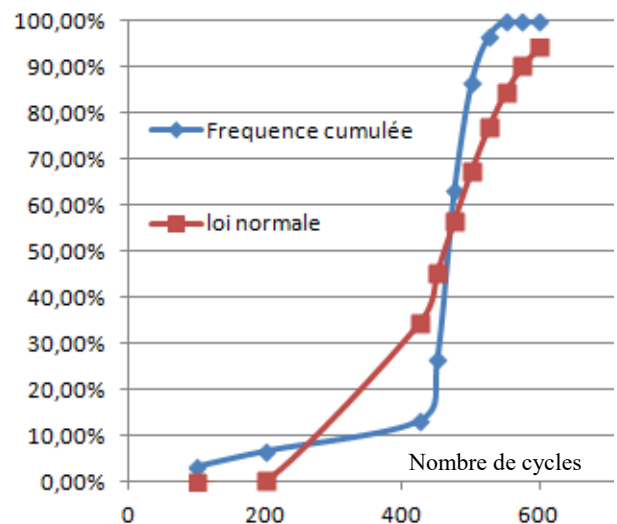


fig 5: Défaillance réelle et estimée avec la loi normale avec deux cellules mortes au bout de 100 et de 200 cycles sur 30 cellules.

Par ailleurs de nombreux articles comprenant des retours sous garantie et des retours maintenance dénoncent la mort subite d'éléments ce qui ne permet plus l'utilisation de l'accumulateur à cause du BMS. Mais comment prendre en compte une mort subite dans la fiabilité d'un accumulateur ?

Si le nombre de cyclages est représentatif lors des essais avec des DOD constant, cette situation n'est pas du tout représentative d'une étude de fiabilité

prenant en compte des retours en maintenance et des retours en garantie. En effet, la profondeur de décharge est aléatoire tout au long de l'utilisation.

Pourtant, l'instrumentation de certains vélos électriques indique le nombre de cycles et surtout la capacité énergétique utilisée.

Mais est ce que l'on peut faire une estimation de la durée de vie en fonction de la consommation d'énergie (A.h ou W.h) ?

A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	K	L	M	N
cycle	bre à 0,8°C	Fréquences	Fréquence cumulée	taux de défaut	ui	F(ui)	frequence inver	tervée densité	F weibull	densité weibull	euler Weibull	loi weibull	densité weibull
375	0	0,00%	0,00%	0,0E+00	-3,288335261	0,000503909	375	0,69%	0,000	0,00%	1,86%	0,02843259	0,0336294
400	1	3,33%	3,33%	1,3E-03	-2,499134798	0,006224847	400	4,49%	0,016	5,54%	12,24%	0,07313226	0,07918921
425	2	6,67%	10,00%	2,7E-03	-1,709934336	0,043639008	425	16,19%	0,118	19,86%	27,20%	0,17184208	0,16533567
450	4	13,33%	23,33%	5,3E-03	-0,920733873	0,178594693	450	32,29%	0,344	33,20%	34,55%	0,35879736	0,2849567
475	12	40,00%	63,33%	1,6E-02	-0,13153341	0,447676679	475	35,63%	0,632	33,11%	27,13%	0,63212056	0,34851737
500	7	23,33%	86,67%	9,3E-03	0,657667052	0,744623951	500	21,77%	0,858	19,94%	12,91%	0,88449824	0,22437632
525	3	10,00%	96,67%	4,0E-03	1,446867515	0,926032984	525	7,36%	0,966	6,93%	3,54%	0,98874905	0,04327406
550	1	3,33%	100,00%	1,3E-03	2,236067977	0,987326341	550	1,37%	0,995	1,30%	0,52%	0,99987861	0,00089554
575	0	0,00%	100,00%	0,0E+00	3,02526844	0,998757937	575	0,14%	1,000	0,12%	0,04%	0,99999998	3,2388E-07
600	0	0,00%	100,00%	0,0E+00	3,814468903	0,999931762	600		1,000	0,01%			
Total:	30												
periode	25			weibull								weibull excel	
cycle moy	479,166667			echelle	100							echelle	0
variance	1003,47222			localisation	375							localisation	475
ecart type	31,6776297			forme	3							forme	15

Tableau 1 : Exemple de statistique sur Excel de la figure 2 et 3

5. Durée de vie à partir l'énergie utilisée

La durée de vie à partir de la consommation va dépendre de l'effet calendaire, des taux de décharge et des profondeurs de décharge DOD.

L'estimation de la durée de vie en fonction de la profondeur de décharge a déjà été effectuée dans de nombreuses publications.

Sur la figure 6, on peut s'apercevoir que pour une profondeur de décharge de 50%, il y a 4 fois plus de cycles possibles par rapport à une profondeur de 100%. La capacité énergétique utilisable est donc double avec des profondeurs de décharge de 50 % par rapport à 100 %.

Le modèle de la courbe mathématique non linéaire de la figure 7 correspond à l'équation suivante :

$$nbr\ de\ cycle = 2.510^6 \cdot DOD^{-1.7} \tag{12}$$

En conséquences, la consommation sur la figure 7 en fonction du DOD est presque linéaire avec pour estimation (13) :

$$Consommation(A.h) = nbr\ de\ cycle \cdot \frac{DOD(\%)}{100} \cdot capacite = 2.510^6 \cdot DOD^{-0.7} \cdot 2.5A.h$$

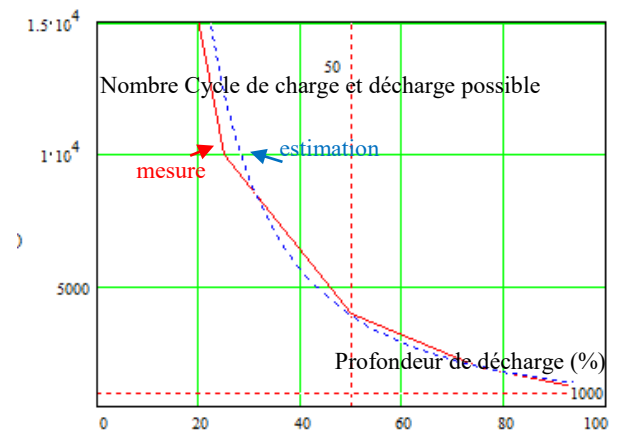


fig 6: Nombre de cycles de charge en fonction du DOD (profondeur de décharge) d'éléments LiNCM

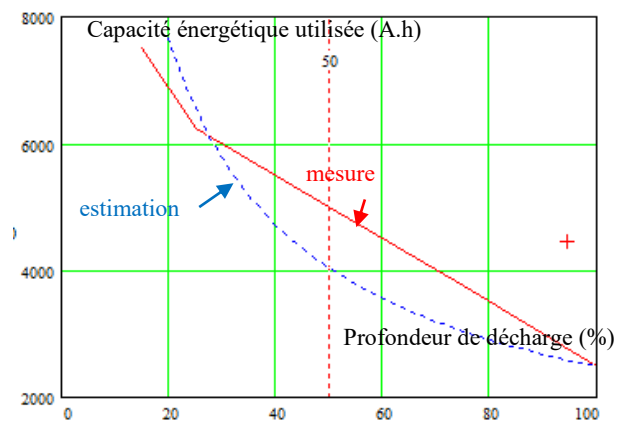


fig 7: Nombre d'Ampère-heure utilisé en fonction du DOD d'éléments LiNCM 2.5A.h.

Les assembleurs d'éléments de batterie pour les systèmes portatifs peuvent faire une étude statistique avec les retours de batteries pendant les garanties de 2 ans ce qui donne plutôt une probabilité sur les morts subites d'éléments. De plus, sur de nombreux systèmes, il n'y a pas d'instrumentation permettant de connaître l'utilisation de la batterie et leur nombre de cycles.

En revanche, pour les batteries de vélo et de voiture l'instrumentation indique le cyclage, le nombre total A.h utilisé, les kilomètres....

Pour les batteries de vélo, il n'y a pas de réparation des produits après les 2 ans de garanties. En revanche, pour les batteries de voiture qui ont une espérance de vie de plus de 8 ans, les statistiques sur la disparité des défaillances des accumulateurs par rapport aux nombres de ventes, existent.

Lors de la mise en œuvre de ces statistiques, le type de défaut pourrait être étudié.

6. Statistique des types de défaut sur une cellule

Après les diagnostics et la réparation des éléments, des statistiques sur le type de défauts peuvent être effectuées. 4 cas de défauts sont souvent répertoriés sur les véhicules à faible consommation d'énergies de l'IUT GEII de Soissons :

- 20% ont des résistances en série internes trop grandes ce qui provoque une chute de tension qui déclenche l'arrêt de la décharge par le BMS.
- 10% des cellules ont des résistances d'autodécharge trop grandes ce qui provoque des temps d'équilibrage bien trop long par un BMS dissipatif.
- 20% ont eu leur séparateur défectueux ou un effet de dendrite qui provoque un court-circuit de l'élément.
- 50% ont des capacités énergétiques de moins de 80% sans avoir de problèmes majeurs au niveau des résistances internes.

Evidemment, le nombre de batteries prises en compte est faible et Les fabricants sont différents. L'étude est donc peu représentative cependant elle permet de donner un ordre de grandeur en fonction du type de défaillance.

7. Prix de la maintenabilité de la batterie.

Sur les batteries de vélos, il faut environ une heure de test pour connaître les éléments incriminés. Ce délai peut être réduit si on dispose d'un BMS connecté par Bluetooth permettant d'enregistrer les données de chaque élément en fonction du courant de charge et décharge [12, 13] sur un smartphone.

Le résultat de cette enregistrement est présenté sur la figure suivante :

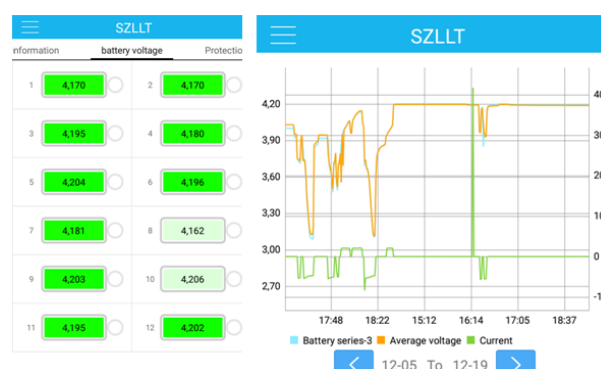


fig 8: Copie d'écran d'une application de BMS.

Les BMS Bluetooth sont de plus en plus utilisés sur les vélos électriques. On les trouve aussi sur les monowheels qui n'ont pas la place d'avoir un écran d'instrumentation.

Il existe aussi des dataloggers qui permettent de faire des enregistrements mais il faut souvent adapter les connectiques et avoir des connaissances informatiques pour extraire les données.

Plus généralement, les tests de batteries sont souvent effectués grâce à des chargeurs équipés d'équilibreurs intégrés et permettant l'enregistrement vers un PC.

Le temps pour changer des éléments de batteries dans un accumulateur de vélo est d'environ 2 heures. Il faut ensuite encore une heure de test pour vérifier qu'il n'y a pas d'autres éléments en défaut.

Etant donné que le coût horaire de la maintenance est proche de 100 €/h, charges comprises, il n'est donc pas viable, hors garantie, de faire réparer une batterie de vélo qui a déjà un certain nombre de cyclages.

Par conséquent, la satisfaction des clients est relativement mise à rude épreuve par des produits, tels que les vélos électriques, utilisant des batteries et il semble que ces problèmes batteries

sont à l'origine des nombreuses ventes que l'on retrouve sur les sites de ventes d'occasion.

Il est de plus envisageable de proposer une formation sur les batteries aux collégiens ou aux lycéens, permettrait à quiconque de faire ces propres investigations. Cette sensibilisation permettrait de donner un deuxième souffle à ces batteries en attendant leur recyclage. D'ailleurs, un livre sur la possibilité de la réutilisation et du recyclage des batteries lithium-ion a été publié sur ce sujet [15].

Mais est ce que toutes les technologies se valent en fonction du nombre de cycles ?

8. Technologie et choix des éléments

Lorsqu'une nouvelle technologie d'accumulateurs est mise sur le marché, il est toujours nécessaire d'établir une comparaison exhaustive pour connaître les avantages et les inconvénients de cette nouvelle solution. Cette mise en œuvre peut être entreprise en prenant en compte de nombreux paramètres comme ceux de la figure suivante :

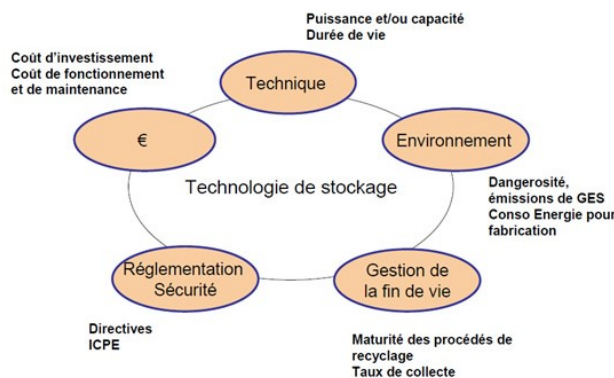


fig 9: Réurrence de choix entre différents accumulateurs d'énergie.

La figure suivante montre le compromis existant entre les différents paramètres d'une batterie :

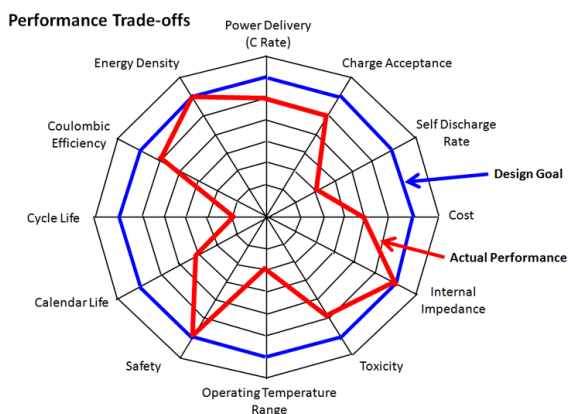


fig 10: Paramètre d'une batterie.

Si le cycle de la durée de vie est donné sur la figure précédente, la probabilité de défaillance n'est pas prise en compte dans les critères précédents alors que nous venons de prouver que ce critère était primordial.

Les cellules Lifer ont un nombre de cycles 4 à 5 plus important. En revanche, pour un prix identique, elles sont 1,5 plus lourdes et encombrantes que les éléments Li MCN.

Les cellules LTO ont un nombre de cycles 15 à 20 plus important que les Li MCN mais elles sont 3 à 4 plus lourdes et encombrantes pour un prix 3 fois plus important à ce jour.

Les éléments LTO ont aussi la possibilité de pouvoir être rechargés 4 à 5 fois plus vite qu'une batterie Lifer ou LiMCN. Il est donc possible d'utiliser moins de capacité énergétique cependant il faut recharger plus souvent. Mais, l'augmentation du taux de charge fait diminuer la durée de vie.

9. Discussion :

Toutes les cellules 18650 des différents fabricants ne se valent pas. D'ailleurs, il existe un site internet qui les compare [5] et qui démontre la grande disparité des spécifications. En revanche, ce site ne teste pas la durée de vie par cyclage. Il suffit que le procédé de fabrication de la cellule change et l'étude de fiabilité ne sera plus valable. De même, il suffit que l'assembleur d'éléments change de marque pour ne plus pouvoir faire d'études de fiabilité. En effet, ces études demandent au moins 1 à 2 ans de retour de données statistiques.

De plus, malgré que des instances institutionnelles essayent de protéger les consommateurs (normes sécuritaires, démarche qualité HQE, efficacité énergétique, garantie obligatoire de 2 ans), il n'existe que peu d'informations pour les consommateurs sur la durée de vie d'un produit équipé d'une batterie. Par ailleurs, la loi Hamon de 2015 qui oblige les constructeurs à afficher le nombre d'années de disponibilité des pièces détachées, n'indique pas la probabilité de leur durée de fonctionnement.

10. Conclusion

Cet article a présenté la problématique de la mise en œuvre de calculs statistiques sur des batteries.

Ces calculs ont été effectués en prenant en compte des fonctions simples du logiciel Excel.

Evidement une utilisation sur une base de données plus large (big data) serait plus pertinente surtout pour inclure le grand nombre de systèmes vendus.

Enfin malgré les nombreux tests précédents et lors d'un lancement d'un nouveau produit sur le marché, les retours de certains lots, présentant des défauts que l'on qualifie souvent de « défauts cachés », restent encore trop fréquents.

Enfin, doit-on sensibiliser les étudiants aux techniques de recyclage et des méthodes de détermination de la durée de vie d'un produit [13] lors de la réalisation d'un projet qu'il faut faire évoluer le référentiel de certaine formation.

11. Références

- [1] T.Baumhöfer, M.Brühl « Production caused variation in capacity aging trend and correlation to initial cell performance » Feb 2014 Journal Power Sources <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0378775313014584>
- [2] N.Williard, W.He, “Reliability and Failure Analysis of Lithium Ion Batteries for Electronic Systems” 2012 13th International Conference on Electronic Packaging Technology & High Density Packaging <http://ieeexplore.ieee.org/document/6474788/>
- [3] Zhitao Liu a, CherMingTan , “A reliability-based design concept for lithium-ion battery pack in electric vehicles” October 2014 <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0951832014002506>
- [4] Ecker.M, Nerea Nieto. N “ Calendar and cycle life study of Li(NiMnCo)O₂-based 18650 lithium-ion batteries”, February 2014 Journal Power Sources <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0378775313016510#>
- [5] [http://lygte-info.dk/review/batteries2012/LG%2018650%20MH1%203200mAh%20\(Cyan\)%20UK.html](http://lygte-info.dk/review/batteries2012/LG%2018650%20MH1%203200mAh%20(Cyan)%20UK.html)
- [6] LG 18650 MH1 http://www.produktinfo.conrad.com/datenblaetter/1500000-1599999/001558879-da-01-en-LG_LIION_AKKU_INR18650MH1_3200MAH.pdf
- [7] PANASONIAC 18650 http://www.datasheet.hk/view_download.php?id=2027681&file=0515%5Cner18650b_7881050.pdf
- [8] A.Sivert, F.Betin, B.Vacossin, M.Bosson, “Capacité énergétique, diagnostic, durée de vie de batterie Lithium Application à l'estimation de l'autonomie d'un véhicule électrique ” Revue 3EI N°84, Avril 2016 <https://hal.archives-ouvertes.fr/hal-01361682/document>
- [9] T.Bruen, J.Marco « Modelling and experimental evaluation of parallel connected lithium ion cells for an electric vehicle battery system“ april, 2016, Journal of Power Sources <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0378775316300015>
- [10] R.Gogoana, B.Pinson “Internal resistance matching for parallel-connected lithium-ion cells and impacts on battery pack cycle life” April 2014, Journal of Power Sources <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0378775313019447#!>
- [11] Telechargement du fichier excel : <https://www.fichier-xls.fr/2018/02/15/fiabilite-delement-18650-battery-lithium/>
- [12] Forum velo : BMS et Dépannage ou maintenance de pack de batterie <http://velorizontale.bbfr.net/t20802-bms-et-depannage-ou-maintenance-de-pack-de-batterie#555463>
Manuel d'utilisation de l'application et BMS bluetooth : https://drive.google.com/file/d/1TLN7vb0ZAH_YkpH813Kq-OYJ1b1eeV57/view
- [13] TD autonome cyclage et durée de vie des produits <https://www.fichier-pdf.fr/2014/12/12/cycle-de-de-produit-iut-aisme-sivert/>
- [14] Différent boîtiers des batteries : https://en.wikipedia.org/wiki/List_of_battery_sizes
- [15] Book :Guangjin Zhao « Reuse and Recycling of Lithium-Ion Power Batteries” mai, 2017
- [16] A. BARRÉ « Analyse statistique de données issues de batteries en usage réel sur des véhicules électriques, pour la compréhension, l'estimation et la gestion des phénomènes de vieillissement », thèse Octobre 2014, U Grenoble <http://www.theses.fr/2014GRENT064>
- [17] Francois Monchy book « La fonction maintenance » 1996 Edition Masson

C'est quoi, un courant électrique ?

JEAN-LOUIS IZBICKI^{1,2}, GEORGES ZISSIS¹

¹ LAPLACE, Laboratoire Plasma et conversion d'énergie, UMR CNRS 5213, Université Toulouse III Paul Sabatier, 118 route de Narbonne, Bat 3R3, 31062 Toulouse cedex 9

² LARHRA, Laboratoire de recherche historique Rhône-Alpes, UMR CNRS 5190, Université Lyon II, Institut des sciences de l'homme, 14 Avenue Berthelot, F69363 Lyon cedex 7.

Résumé : En s'appuyant sur les textes originaux du XIXe s., cet article associe les avancées, théoriques et expérimentales, des physiciens et des chimistes. Elles sont indispensables pour comprendre le phénomène électrique. Si la pile Volta est bien le premier générateur assurant la circulation d'un courant permanent, c'est en étudiant cette pile, ainsi que l'électrolyse qui est sa première application, que la nature du courant électrique peut être comprise. L'élaboration du concept de courant électrique est alors datable, de façon pertinente, du tout-début du XXe s., après l'établissement progressif des concepts d'ion et d'électron. À cette même période, les valeurs du nombre d'Avogadro, de la charge de l'électron et de sa masse, furent estimées avec une précision satisfaisante, notamment par Jean Perrin, bien avant l'expérience de Robert Millikan.

1. Introduction

Vers 1900 les applications de l'électricité sont nombreuses et se rencontrent principalement dans les grandes villes, à travers l'éclairage électrique dans les bars, les salles de spectacle et dans certains musées, l'éclairage public, certains transports mais aussi chez quelques particuliers. Cependant à la question de la nature du courant électrique, le grand public serait bien en peine d'apporter un élément de réponse. Il en va de même des scientifiques de l'époque. Ainsi Georges Claude, dans son introduction à son livre « L'électricité à la portée de tout le monde » [1] paru en 1905 écrit : « *Qu'est-ce que l'électricité ? Si tous ceux auxquels la fée bienfaitrice de notre époque a eu l'occasion de rendre service s'avisaient quelque jour de le demander à ceux qui le savent — ou qui croient le savoir — ce ne serait certes pas une petite opération que de les satisfaire!* ».

Pourtant le premier dispositif permettant à l'énergie électrique d'être disponible remonte à la toute fin du dix-huitième siècle, il s'agit de la pile Volta, et les nombreuses recherches concernant l'électricité ont plutôt privilégié les applications dès 1800 en particulier la synthèse de nouveaux produits à partir de l'électrolyse. Cependant de nombreux travaux théoriques ont eu lieu, un changement de mode de pensée nécessaire à la compréhension de la nature du phénomène électrique implique la discontinuité de la matière, nouveau paradigme qui se mettra en place lentement au cours du dix-neuvième siècle. Il s'agit dans cet article de répondre à la question de la nature du courant électrique à partir de sa première source historique c'est-à-dire à partir de la compréhension des phénomènes se produisant dans la pile Volta ou dans les phénomènes d'électrolyse qui sont historiquement liés. Cette compréhension appartient à la fois aux physiciens

et aux chimistes, communautés scientifiques disjointes à partir du milieu du dix-neuvième siècle et dont le vocabulaire, s'il est parfois identique, recouvre des concepts différents. Cette différenciation a sans doute retardé l'explication du phénomène « électricité ». Est-ce qu'en prenant en compte les données provenant à la fois des physiciens et des chimistes arrive-t-on à répondre à Georges Claude ?

2. Présentation

Au XIX les mesures concernant les phénomènes électriques — on ne dit pas encore électrostatiques — sont réalisées principalement par des mesures mécaniques. Les appareils servant à obtenir des charges électriques mettent en jeu un phénomène de frottement bien usuel en mécanique. Par contre pour assurer la circulation permanente des charges électriques il faut faire appel à de nouveaux concepts soit chimiques, comme dans la pile de Volta, soit électromagnétiques dans lesquels se retrouvent une partie mécanique malgré le mot « électromagnétique » qui ne montre pas une connotation « mécanique ». De ce point de vue l'explication des phénomènes se produisant dans la pile de Volta est déconnectée en grande partie des phénomènes mécaniques. Dès lors il est tentant d'essayer de construire les concepts électriques de base, « courant » et « tension », essentiellement en interrogeant les phénomènes liés à la pile. Ce faisant, il apparaît que la chimie joue un rôle primordial par les réactions d'oxydo-réduction se produisant dans les piles et la branche des sciences correspondante s'appelle justement « électrochimie », terme qui rend bien compte des apports nécessaires liés à la fois à la physique et à la chimie. Cette approche est d'autant plus féconde que c'est par le biais de la chimie que la matière va apparaître comme discontinue ou formée à partir de

briques discrètes, qu'une molécule est formée à partir d'atomes, et que le nombre d'atomes dans une molécule est obligatoirement un nombre entier. En conséquence il en est de même des charges électriques qui ne peuvent pas prendre n'importe quelle valeur ; la réciproque étant vraie il est équivalent de présenter la nature « atomique » de la matière ou du courant électrique. De nombreuses batailles intellectuelles ont eu lieu sur l'existence et la définition précise des concepts d'atomes, de molécule et d'ions, cependant la majorité des chimistes européens est « atomiste » à la fin du XIXe siècle même si en France le retard scientifique sur les concepts précédents est patent et aujourd'hui bien reconnu [2]. Dans le même temps, les physiciens utilisent presque tous la notion d'éther pour expliquer les phénomènes électriques et électromagnétiques ce qui obscurcit, à la fois pour le lecteur d'hier et d'aujourd'hui, la lecture des textes originaux et la compréhension des phénomènes physiques. Les notions fondamentales de base de l'électricité ne peuvent donc pas être clairement énoncées et les physiciens sont amenés à des contorsions oubliées de nos jours pour répondre à la question de la nature du courant électrique. De plus les notations mathématiques sont lourdes à la fin du XIXe siècle car l'appareillage vectoriel n'est qu'à peine utilisé. Il faudra attendre les années 1920 pour éclaircir le paysage : fin de l'éther, utilisation de mathématiques adaptées mettant en jeu les vecteurs, reconnaissance de la nature discontinue de la matière, premiers éléments de l'existence d'un monde subatomique...

La nature du courant électrique est discutée à partir des années 1820, lorsqu'Ampère commence à définir ce vocabulaire et ce concept [3]¹. Dans un mémoire « Présenté à l'Académie royale des Sciences, le 2 octobre 1820, où se trouve compris le résumé de ce qui avait été lu à la même Académie les 18 et 25 septembre 1820, sur les effets des courants (sic) électriques », le premier paragraphe indique : *« L'action électromotrice se manifeste par deux sortes d'effet que je crois devoir d'abord distinguer par une définition précise. J'appellerai le premier tension électrique, le second courant électrique. Le premier s'observe lorsque les deux corps entre lesquels cette action a lieu sont séparés l'un de l'autre [ici Ampère place une note] par des corps non conducteurs, dans tous les points de leurs surface autres que ceux où elle est établie ; le second est celui où ils sont, au contraire, partis d'un circuit de corps conducteurs qui les font communiquer par des points de leur surface différents (sic) de ceux où se produit l'action*

¹ L'expression « courant électrique » est attestée en 1806 (suivant [Alain Rey, Dictionnaire historique de la langue française, tome 1, Paris : Le Robert, 1998] à l'article « électrique » p1201 mais aucun auteur n'est de cette expression est mentionné). Cependant « Le grand vocabulaire françois », tome 9, publié en 1769 (p63) mentionne déjà cette expression dans un contexte d'écoulement transitoire de charges en électrostatique.

² A moins de toucher le dispositif par ses deux extrémités auquel cas on reçoit une commotion appelée décharge, le dispositif reste « chargé ». L'abbé Nollet (1700-1770) a

électromotrice ». Le souci de préciser le vocabulaire est fondamental et rompt avec le vocabulaire de l'époque. En effet, dans ces années on parlait de fluide électrique et il y en avait de positif et de négatif. Le vocabulaire « courant » est bien lié, encore aujourd'hui, à un écoulement alors que, dans les bouteilles de Leyde, dispositif datant des années 1745, les charges électriques ne se déplacent pas, elles y sont emmagasinées². Les éléments déclencheurs de l'élaboration de ce concept de « courant » sont d'une part la fabrication d'une pile par Volta en 1799, et ceci est bien reconnu [4] et, d'autre part, les expériences d'Oersted en 1820 [5]. Plus précisément, si on s'intéresse au passage du courant dans un fil électrique, il est usuel, notamment dans les ouvrages d'enseignement, d'attribuer à Joseph John Thomson « la découverte de l'électron » en 1897 [6] puis à Millikan la mesure la charge de l'électron en 1909. Ceci permet aujourd'hui à un étudiant de pouvoir décrire le courant électrique comme une circulation ordonnée d'électrons dont la charge et la masse sont bien connues³. Il faut remarquer que la démarche classique utilise quasi-exclusivement des recherches en physique⁴. La démarche associant successivement rayons cathodiques et expérience de Millikan est également celle de nombreux ouvrages universitaires [7].

Cependant de nombreux faits remettent en question le cheminement précédent. Drude, lors du premier congrès international organisé par la SFP à Paris en 1900, en parallèle l'exposition universelle, développe déjà l'explication de la conductivité électrique à partir de la « théorie des électrons » [8]. Lors du centenaire de l'expérience de Thomson, de nombreux textes ont adopté un regard critique sur l'attribution à Thomson de la découverte de l'électron [9]. Assez curieusement les textes ne mentionnent pas clairement l'hypothèse qu'il pourrait y avoir une différence entre une charge électrique liée à un milieu matériel (cas du courant électrique dans les solides, de l'expérience de Millikan) et une charge électrique libre (expériences de Thomson). A part la valeur commune du rapport charge sur masse, il apparaît que seule une connaissance minimum de l'atome et de l'extraction des électrons à partir des atomes permet de comprendre qu'il s'agit bien du même objet.

Pourrait-on écrire une autre histoire pour expliquer la nature du courant électrique ? Y a-t-il d'autres scientifiques du dix-neuvième siècle qui ont réfléchi autrement et dont les écrits n'ont pas été suffisamment

largement popularisé ce type d'expérience à la cour de Louis XV.

³ Bien entendu, dans certains solides, il faut attribuer à une circulation ordonnée de trous le passage du courant électrique.

⁴ L'électrolyse est, pour un physicien de la fin du XIX^{ème} et même du XX^{ème}, un « effet » du courant électrique. Ce phénomène fait aujourd'hui partie de l'électrochimie, science que l'on devine hybride entre physique et chimie, vue son nom. C'est pourtant à partir de l'étude de ce phénomène que l'idée d'atome d'électricité va se faire jour à la fin du XIX^{ème}.

pris en compte, pour des raisons variées, et qui, au tout début du XX^{ème} siècle, avaient déjà la compréhension de la nature du courant électrique et qui connaissaient les aspects quantitatifs attribués à Thomson et à Millikan ? Ne peut-on pas rester au plus près de la naissance de l'électricité dynamique, c'est-à-dire de l'électricité des charges en mouvement ? En définitive, l'explication complète des phénomènes se produisant dans la pile Volta ne permettent-ils pas de répondre à la question « c'est quoi un courant électrique » ? C'est le but de cet article. Le parti pris est de donner des extraits des textes originaux afin d'éviter d'utiliser des termes d'un vocabulaire actuel ; ces extraits sont parfois volontairement longs afin de ne pas dénaturer le propos de l'auteur.

La démarche qui suit tend à réunir des résultats provenant à la fois de recherche en physique et en chimie. Ces recherches sont également liées à la reconnaissance de la nature discontinue de la matière et aux combats difficiles qui a opposé atomiste et anti-atomiste notamment en France. Elles sont perturbées par les problèmes de vocabulaire car les mots atome, molécule, ion n'ont pas forcément la même signification chez tous les chercheurs de l'époque. De plus, au moment où les atomistes semblent enfin avoir convaincu le monde des savants, la découverte (en 1896 par Henri Becquerel) de la « radio-activité », en utilisant l'orthographe de l'époque, montre que certains atomes ne sont pas stables, ce que personne n'avait encore envisagé. L'électron apparait comme une entité douée de charge, mais pas forcément de masse, concept qui va évoluer à partir de son apparition dans les années 1870. Même Thomson ne parlera pas d'électron mais de corpuscule [10] dans sa conférence de réception du prix Nobel dont le titre mentionne des porteurs de charge électrique négative. Le texte débute par : « *In this lecture I wish to give an account of some investigations which have led to the conclusion that the carriers of negative electricity are bodies, which I have called corpuscles, having a mass very much smaller than that of the atom of any known element, and are of the same character from whatever source the negative electricity may be derived* ». Par contre Thomson signale que la charge de ce corpuscule, sous entendu en valeur absolue, correspond à celle bien connue en électrolyse : « *This value is the same as that of the charge carried by a hydrogen atom in the electrolysis of dilute solutions, an approximate value of which has been long known* ». Peu de chercheurs ont à la fin du XIX^{ème} ou au début du XX^{ème} siècle à la fois une compréhension globale des sciences physiques et chimiques et en même temps conçoivent l'acceptation de la nature discontinue de la matière. L'analyse de la nature de l'électricité amène les

scientifiques à analyser la nature de la matière ce qui met en jeu naturellement l'ensemble des sciences physiques associant physique et chimie. La première « particule » qui va émerger de cette analyse est l'électron, objet réel et concept aussi nécessaire aux physiciens et aux chimistes. Or c'est bien en unifiant les idées développées en physique et en chimie que Jean Perrin aura plus rapidement que d'autres chercheurs la réponse à la question « Qu'est ce qu'un courant électrique » même si l'histoire des sciences n'a pas reconnu son nom pour sa compréhension de la nature du « fluide électrique ».

3. De Volta à Faraday

Dans une lettre adressée à Joseph Banks alors président de la Royal society à Londres en vue de publication [11]⁵ Volta présente son travail sur son dispositif, connu depuis sous le nom de pile de Volta. Il se trouve que Joseph Banks communique à Anthony Carlisle la lettre de Volta : ils habitent tous deux Soho Square et se connaissent bien. Carlisle fabrique donc, en suivant les instructions de Volta, une pile et réalise avec son ami William Nicholson une série d'expériences qui sont publiés dans « *The Journal of Natural Philosophy, Chemistry & the Art* » qui appartient d'ailleurs à Nicholson [12]⁶. Parmi ces expériences il y a l'électrolyse de l'eau (avec le vocabulaire d'aujourd'hui) et le gaz hydrogène qui est produit est reconnu. L'article parait en juillet 1800. Il est possible qu'une électrolyse de l'eau ait été réalisée en 1799 de façon transitoire, car réalisée avec une machine électrostatique, et l'article correspondant est peu accessible (car écrit en néerlandais)⁷. Une autre référence parle des premières expériences de « décomposition » de l'eau par l'électricité qui « paraissent dues à Troostwik et Dieman en 1795. Ils employaient l'étincelle des batteries partant entre deux fils d'or ou de platine » [13]. Le mot batterie doit être impropre : il doit s'agir d'une machine électrostatique. Mais l'idée de tenter un passage électrique dans l'eau est « dans l'air » à la fin du dix-huitième siècle.

En 1839 Michael Faraday rassemble dans un volume [14] des travaux publiés dans *Philosophical Transactions* depuis novembre 1831 et concernant essentiellement l'électrochimie et les courants électriques dans différents matériaux. Un sous paragraphe intitulé « *Theory of electro-chemical decomposition* » (qui contient les notes 477 à 563 de la

⁵ Le site de *Philosophical transactions of the Royal society of London* indique comme date de publication le 1 janvier 1800 ce qui est impossible. Le livre « *A Source book of chemistry* » de Henry M. Leicester et Herbert S Klickstein, Harvard University Press 1968 indique que la note de Volta est lue le 26 juin 1800 (p 239). Ceci parait plus conforme aux documents de Volta.

⁶ Il faut noter que le nom de Carlisle n'apparait pas dans le titre de l'article du journal mais est bien cité dans le cœur de l'article. Ceci explique qu'aujourd'hui on associe Nicholson et Carlisle pour leurs expériences d'électrolyses.

⁷ L'indication de cette référence se trouve dans Holger Dau et al, *The Mechanism of Water Oxidation: From Electrolysis via Homogeneous to Biological Catalysis ChemCatChem*, 2, 724–761, 2010.

page 135 à la page 164) qui a été envoyé en mars 1833 est particulièrement intéressant pour la suite de cet article. Il fait d'abord le point sur les recherches passées sur l'électrolyse (Grotthus 1805, Davy 1806 et 1826, Riffault et Champré 1807, Biot 1824, De la Rive 1825, Hachette 1832). Après avoir décrit ses propres expériences il en arrive à la conclusion (note 505) « *For a constant quantity of electricity, whatever the decomposing conductor may be, whether water, saline solutions, acids, fuses bodies etc., the amount of electrochemical is also a constant quantity, i.e. would always be equivalent to a standard chemical effect founded upon ordinary chemical affinity.* ». Ceci constitue une loi quantitative fondamentale. Afin de préciser sa pensée sur ce qui se passe lors d'une électrolyse, et bien conscient qu'il introduit des concepts nouveaux Faraday introduit le vocabulaire encore utilisé aujourd'hui, et qu'on pourrait appelé jargon en son temps, dans une note de janvier 1834 : il introduit les mots « *electrode* »⁸ (note 662, p 196), « *anode* » et « *cathode* »⁹ (note 663, p196-197), « *anion* », « *cation* » and « *ion* »¹⁰ (note 665, p 198). Il ajoute dans la note 666 : « *These terms being once well defined, will, I hope, in their use enable me to avoid much periphrasis and ambiguity of expression* ». Cependant il utilise l'expression « *courant électrique* » dans ses définitions, car il ne distingue pas l'existence de porteurs de charge de leurs circulations, ce qui jette une ombre sur celles-ci. Il semble également que pour Faraday c'est le courant électrique qui produit les ions dans l'électrolyte. Mais y a-t-il un lien avec les atomes ? Faraday sur ce point est hésitant (note 869 p236) : « *Or, if we adopt the atomic phraseology, then atoms of bodies which are equivalents to each other in their ordinary chemical action, have equal quantities of electricity naturally associated with them. But I must confess I am jealous of the term atom; for though it is very easy to talk of atoms, it is very difficult to form a clear idea of their nature, especially when compound bodies are under consideration* ». Le point fondamental est l'apparition du concept d'ions alors même que la notion d'atome n'est pas encore ni admise ni complètement étayée expérimentalement. Par là même il commence à donner une piste pour répondre à la nature du courant

électrique dans un liquide. A partir d'un très grand nombre de mesures mettant en relation les masses de produits dégagés par électrolyse et les quantités d'électricité correspondantes, Faraday formule les deux lois quantitatives suivantes [15]:

i) La masse des produits libérés pendant un temps donné est proportionnelle à la quantité d'électricité qui traverse l'électrolyte pendant ce temps. Cette masse est indépendante des caractéristiques géométriques de la cuve à électrolyse et des électrodes ainsi que de la concentration de l'électrolyte.

ii) Les équivalents électrochimiques coïncident avec les équivalents chimiques, ou autrement dit : Quel que soit l'électrolyte, la quantité d'électricité qui libère un équivalent chimique d'un corps est toujours la même.

Il faut également rajouter que Faraday identifie ce qui se passe dans la pile Volta comme une réaction chimique (note 872 p 257) : « *...I think that the current of electricity in the voltaic pile is sustained by chemical decomposition, or rather by chemical action, and not by contact only* »¹¹. Si on admet l'hypothèse atomique et donc le fait que les réactions chimiques sont liées à des réarrangements atomiques et que la matière est discontinue car formé d'atomes, peut-on encore parlé de fluide électrique qui est un milieu continu ? Le fait de formuler cette question revient à Helmholtz plus de 40 ans après l'étude des phénomènes d'électrolyse par Faraday. Cependant les travaux de Hittorf dans les années 1850 sur le déplacement des ions dans les liquides conducteurs, ceux de Clausius de 1857 montrant l'existence des ions dans les solutions d'électrolyte préalablement au passage du courant, et ceux de Kohlrausch en 1874 ont permis de renforcer le concept d'ions ébauché par Faraday¹².

Un aspect plus quantitatif est obtenu quand Faraday réalise un circuit comportant plusieurs électrolyseurs en série ce qui lui permet de mesurer, pour un courant d'intensité donnée, les masses des produits obtenus aux différentes électrodes. Il écrit (§835, p244) : « *Electrochemical equivalents are always consistent ;i.e., the same number which represents the equivalent of a substance A when it is separating from a substance B, will also represent A when separating from a third*

⁸ Avant Faraday le mot pôle était utilisé pour l'objet placé dans le liquide subissant l'électrolyse, mais ce mot est aussi déjà utilisé par ailleurs (pour les aimants, en géographie) et donc « *In place of the term pole, I propose using that of Electrode, and I mean thereby that substance, or rather surface, whether of air, water, metal, or any other body, which bounds the extent of decomposing matter in the direction of the electric current* ». Bref il s'agit du conducteur immergé dans le liquide. Ampère a utilisé le mot réopore, vocabulaire également utilisé par Lamé dans ses cours à Polytechnique en 1840.

⁹ Il définit anode comme suit : « *the anode is therefore that surface at which the electric current according to our presentation, enters : it is the negative extremity of the decomposing body; is where oxygen, chlorine, acids, etc., are evolved* » et cathode : « *the cathode is that surface at which the current leaves the decomposing body; and is its positive extremity* ».

¹⁰ Faraday justifie précautionneusement son choix (note 665) : « *Finally I require a term to express those bodies which can pass to the electrodes, or, as they are usually called, the poles. Substances are frequently spoken of as electro-negative or electro-positive, according as they go under the supposed influence of a direct attraction to the positive or negative pole.* ». Puis il continue par « *I propose to distinguish such bodies by calling those anions which go to the anode of the decomposing body; and those passing to the cathode, cations; and when I have occasion to speak of these together, I shall call them ions.* ».

¹¹ Rappelons que le mémoire de Volta de 1800, concernant son invention de la pile a pour titre « *On the Electricity excited by the mere contact of conducting substances of different kinds.* » alors qu'elle est le siège d'une réaction chimique qu'on n'appelle pas encore oxydo-réduction.

¹² Il faut également citer les travaux d'Alexander William Williamson de 1851 concernant la synthèse de l'éther

substance C. Thus 8 is the electrochemical equivalent of oxygen, whether separating from hydrogen, or tin, or lead; 103.5 is the electrochemical equivalent of lead, whether separating from oxygen, or chlorine or iodine. » Un équivalent dans la chimie du dix-neuvième-siècle (ou équivalent gramme ou poids équivalent) est le rapport pondéral suivant lequel un corps se combine avec un autre corps pris comme base ; cette base est l'hydrogène pris comme unité dont l'équivalent est donc 1. C'est une notion pré-atomiste qui sera totalement éliminée au début du vingtième siècle. Faraday affirme (§836) que « *Electrochemical equivalents coincide, and are the same, with ordinary chemical equivalents* ». Ainsi le nombre 8 attribué à l'oxygène provient du fait que dans la molécule d'eau le rapport de la masse de l'oxygène à celle de l'hydrogène est 8 (ce qui est vrai) mais les chimistes d'alors pensaient que l'eau devait être décrite par HO ou H₂O₂ (à ne pas confondre avec notre eau oxygénée) puisqu'on ne connaît alors que les rapports et non pas par H₂O qui implique une valeur de 16 pour l'oxygène. Comme Faraday a sans doute manipulé avec un oxyde de plomb PbO₂ et un oxyde d'étain SnO₂ sa proposition est correcte. Faraday en déduit une table d'ions (§847) qui attribue 35.5 au chlore (aujourd'hui on écrirait ion Cl⁻), 23.3 au sodium (ion Na⁺) mais 20.5 au calcium (ion Ca²⁺) au lieu de 40. La description est donc correcte pour tous les ions « monovalents » c'est-à-dire chargé une fois (en excès ou en défaut). Puis Faraday se pose la question (§852 et suivants p 249) de la quantité d'électricité « *On the absolute quantity of Electricity associated with the particles of atoms of matter* ». Mais il ne va pas jusqu'à un aspect quantitatif. Cependant, au cours de son raisonnement, il formule deux idées : la première (§851) est prémonitoire du rôle des électrons dans les réactions chimiques et dans le phénomène d'électrolyse « *for I have such conviction that the power which governs electro-decomposition and ordinary chemical attractions is the same ;* » et la seconde (§869) est proche de ce que Helmholtz écrit sur l'électrolyse en 1881 où il fait clairement un lien entre l'existence des atomes et le fait que l'électricité a une nature également discontinue comme la matière « *Or, if we adopt the atomic theory or phraseology, then the atoms of bodies which are equivalents to each other in their ordinary chemical action, have equal quantities of electricity naturally associated with them. But I must confess I am jealous of the term atom; for though it is very clear to talk of atoms, it is very difficult to form a clear idea of their nature, especially when compound bodies are under consideration* ». Il semble que les premières mesures précises de la charge nécessaire pour déposer un « équivalent chimique » datent de 1884 [16]. Il s'agit d'étudier les dépôts d'argent lors de l'électrolyse de solutions de nitrate d'argent. En une heure, 4,0246 g d'argent sont déposés ce qui correspond, pour un « équivalent » d'argent à une charge de 96600 coulombs environ. L'apport de Faraday apparaît donc comme fondamental à la fois dans la définition des phénomènes électrochimiques et du vocabulaire associé, et aussi dans un aspect menant à une donnée quantitative, qui est

appelée la constante de Faraday, et qui établit un lien entre grandeur microscopique et macroscopique.

4. L'analyse de l'électrolyse par Helmholtz et Stoney.

Helmholtz est impliqué dans de nombreuses questions scientifiques comme l'acoustique, l'énergie, la thermodynamique et l'électromagnétisme. Mais il a un apport décisif pour la construction de « l'électricité ». L'existence d'une liaison entre, d'une part, l'existence d'atomes correspondants aux faits que la matière est discontinue et non pas continue, comme le pense encore bon nombre de physiciens et de chimistes de l'époque, et, d'autre part, les phénomènes électriques par le biais de l'analyse de l'électrolyse est réalisée lors d'une conférence, « The Faraday Lecture », donnée devant « the Fellows of the Chemical Society » à Londres le 5 avril 1881 puis publiée peu après dans une revue hebdomadaire [17]. On trouve dans cet article la phrase : « *Now the most startling result, perhaps, of Faraday's law is this: If we accept the hypothesis that the elementary substances are composed of atoms we cannot avoid concluding that electricity also, positive as well as negative, is divided into definite elementary portions, which behave like atoms of electricity* ». Jusque-là on parlait du fluide électricité et c'est la première fois qu'est envisagée une hypothèse de type atomiste pour expliquer la nature de l'électricité. Il ne faut cependant pas penser que tout est clair dans l'article de Helmholtz puisqu'en parlant des anions et des cations qui se déplacent dans le « fluide électrolytique » subissant l'électrolyse il écrit « *through each section of an electrolytic conductor we have always equivalent electrical and chemical motion* », ce qui est considéré comme tout à fait acceptable aujourd'hui, mais qui est suivi de « *This we may call the electric charge of the atom.* » ce qui paraît bien obscur. Le fluide électrolytique est donc pour Helmholtz un ensemble d'atomes ou de groupe d'atomes qui porte des charges électriques : ceci est dû au fait que la définition des ions par Faraday n'était pas complètement intrinsèque parce qu'elle n'utilisait pas uniquement la notion d'atomes (indépendamment du passage d'un courant électrique). Une discussion plus approfondie de ce point est donnée dans [18]. Helmholtz écrit encore : « *As long as it moves about on the electrolytic liquid each atom remains united with its electric equivalent or equivalents. At the surface of the electrodes decomposition can take place if there is sufficient electromotive power, and then the atoms give off their electric charges and become electrically neutral.* ». La confusion ou au moins le manque de clarté sur la question atome/ion est évidente mais la description physique du phénomène d'électrolyse aux électrodes est presque complète, et est bien actuelle, mais il reste la question de savoir ce que devient la charge électrique une fois qu'elle a été abandonnée par l'ion. Pour avancer vers la compréhension de la « nature » de l'électricité, il est

donc nécessaire de s'appuyer sur la nature atomique de la matière qui intéresse, ou devrait intéresser physiciens et chimistes et de tenter de préciser le vocabulaire. Même après le congrès international de Karlsruhe de 1860, premier congrès international, essentiellement européen, de chimie organisé pour tenter de trouver un langage commun, où les chimistes discutent atome, molécules et poids atomiques [19] la bataille fait rage en France en atomistes et anti-atomistes ce qui explique la quasi absence des physiciens ou chimistes français dans la discussion¹³.

Le raisonnement de Helmholtz sur les ions apparaît si simple qu'on peut se demander pourquoi il n'est pas adopté par les physiciens de l'époque. Darrigol propose une explication : « *There was more specific reason for the neglect of Helmholtz's picture. In Germany, a growing number of physicists favoured a phenomenological approach that avoided microphysical assumptions.* » [18]. Il faut adjoindre à Helmholtz, George Johnstone Stoney, professeur à Galway puis à Dublin [20], certes moins connu¹⁴, mais qui a également soutenu une interprétation de l'électrolyse analogue à celle d'Helmholtz [21]. En effet, en 1881 [22], puis en 1883 [23]¹⁵ il écrit « *For each chemical bond which is ruptured within an electrolyte a certain quantity of electricity traverses the electrolyte, which is the same in all cases. This definite quantity of electricity I shall call E1 If we make this our unit quantity of electricity, we shall probably have made a very important step in our study of molecular phenomena.* ». La phrase de Stoney est loin d'être claire : en quoi le choix de l'unité donne un renseignement sur un phénomène moléculaire ou atomique ? La définition de « bond » donnée par Stoney est aussi en avance sur la définition de la liaison de covalence qui n'interviendra qu'au vingtième siècle : « *The word bond is here used of the connexions between atoms when they enter into combination. When we use this, which seems the proper signification of the word, the bonds are to be distinguished from the hands*

¹³ Comme témoignage de cette bataille, on peut citer Alfred Naquet, qui a été un étudiant de Wurtz, un des rares professeurs de chimie français convaincu par les idées atomistes, qui a écrit un fascicule intitulé « De l'atmicité », publié en 1868 à Paris et qui commence par : « *Les adversaires de la théorie atomique et des formules de constitution nous accusent chaque jour, d'oublier les principes de notre science ; ils disent que nous ne faisons plus de la science positive, mais des suppositions toutes gratuites, qui ne conduisent à rien ; qu'en un mot notre chimie est une chimie métaphysique. Notre but est de repousser ces attaques en faisant voir que la théorie atomique et les formules de constitution qui en découlent, sont des théories et des hypothèses parfaitement légitimes, permises, même par la philosophie la plus scrupuleuse à ce point de vue, par la philosophie positive.* ». Naquet vise certainement Berthelot grand chimiste, grand mandarin et grand pourfendeur des atomes jusque dans les années 1890, qui n'avait pas participé au congrès de Karlsruhe.

¹⁴ Il se plaint d'ailleurs auprès des éditeurs de la revue Philosophical Magazine en octobre 1894 que son nom ne

or feelers which each atom has, and which, by grappling with the hands or feelers of other atoms, establish bonds between them. ». Il soutient que ces idées avaient déjà été proposées en 1874 : « *This paper was read before section A., of the British Association at the Belfast Meeting in 1874.* ». Les unités naturelles de Stoney sont sûrement à rapprocher du système de Planck proposé en 1899 ou un certain nombre de constantes de la physique sont choisies égales à l'unité de façon à adimensionner les grandeurs physiques¹⁶. Quantitativement, Stoney donne une valeur à E1 ce qui nécessite une valeur d'un nombre, appelé aujourd'hui nombre d'Avogadro, qui est caractéristique de la nature atomique de la matière. Dans les conditions normales de température et de pression (0°C et 1 atm), l'hypothèse d'Avogadro Ampère (émise en 1811 par Avogadro et reprise par la suite par Ampère) est que le volume occupé par un gaz est indépendant de la nature du gaz¹⁷. Ce volume comprend un certain nombre de molécules, qui est le nombre d'Avogadro. Celui-ci est obtenu à partir des travaux de J. Loschmidt (en 1865) et de W. Thomson (en 1870). Stoney obtient pour la valeur de la charge électrique $E1=10\text{-}20$ coulomb ce qui est un ordre de grandeur correct par rapport à la valeur reconnue de la charge de l'électron. Cependant la notion de particule ou de corpuscule n'apparaît pas dans les textes de Stoney dans les années 1874-1883. Ainsi, dans ces écrits, Stoney s'approche de la notion de charge élémentaire sans l'identifier clairement ; mais la coïncidence numérique et la description de sa liaison chimique a sans doute permis de distinguer Stoney dans la cohorte des physiciens ayant contribué à la naissance du concept d'électron.

5. La contribution de Maxwell

James Clerk Maxwell, le physicien qui réunit les phénomènes électriques et magnétiques et qui propose un ensemble d'équations qui regroupent et étend les connaissances de l'époque, s'intéresse aussi forcément à la compréhension de la conduction électrique¹⁸. Dans

soit pas cité, au même titre qu'Helmholtz ; il revendique même son antériorité dans l'interprétation de l'électrolyse. Le texte de Helmholtz de 1881 apparaît cependant beaucoup plus clair.

¹⁵ Il s'agit en fait du même texte !

¹⁶ Par exemple la constante de gravitation et la vitesse de la lumière sont posées égales à 1. Il en est de même de la constante de Boltzmann, celle de Planck et de la constante intervenant dans la loi de Coulomb. Ceci revient à introduire un temps de Planck, une longueur de Planck, ... etc. Même si certaines relations sont alors simplifiées, il faut bien remarquer qu'elles deviennent difficiles à lire.

¹⁷ Cette loi s'applique en théorie à des gaz « parfaits ». Plus tard on a introduit la notion de mole et on a donné une autre définition à ce nombre d'Avogadro. Aujourd'hui il est défini par le nombre d'atomes contenu dans 12g de carbone (solide) dont le noyau comporte 6 protons et 6 neutrons.

¹⁸ Forcément, puisque les sources des champs électriques et magnétiques qu'étudie Maxwell sont les courants électriques.

son traité d'électricité et de magnétisme [24] Maxwell en 1873 définit (§231) « *a transient current* » entre deux corps A et B portés initialement à des potentiels différents, mais qui, par un mouvement de charges électriques, reviennent au même potentiel. Ce mouvement transitoire de charge est le courant électrique. Juste après (§232) Maxwell montre qu'il existe également un « *steady current* » qui peut être produit par une pile voltaïque. Il ne revient pas alors sur la nature du courant (Quelle(s) charge(s) ? et quel mouvement ?) et s'intéresse aux propriétés des courants (par exemple « *electrolytic action of the current* » (p291). Puis à partir du paragraphe 255 (p307) il revient à la description de la conduction électrique dans les liquides conducteurs reprenant essentiellement, en les citant, les idées de Faraday, Hittorf et Clausius. Il est bien conscient du fait que « *The complète investigation of Electrolysis belongs quite as much to Chemistry as to Electricity* ». Mais aussi, et ce qu'il écrit est prémonitoire : « *Of all electrical phenomena electrolysis appears the most likely to furnish us with a real insight into the true nature of the electric current, because we find currents of ordinary matter and currents of electricity forming essential parts of the same phenomenon. It is probably for this very reason that, in the present imperfectly formed state of our ideas about electricity, the theories of electrolysis are so unsatisfactory.* ». Les concepts de molécules, d'ions et de charges électriques sont encore vagues : « *In the first place, we must assume that in every electrolyte each molecule of the cation, as it is liberated at the cathode, communicates to the cathode a charge of positive electricity, the amount of which is the same for every molecule not only of that cation but all other cations.* ». Le vocabulaire « *molecule of the cation* » est difficile à comprendre aujourd'hui¹⁹. Dans [25] Maxwell montre clairement où en est sa réflexion sur les concepts d'atome et de molécule ; il écrit « *Do atoms exist, or is matter infinitely divisible? But we must now go on to molecules. Molecule is a modern word. It does not occur in Johnson's "Dictionary." The ideas it embodies are those belonging to modern chemistry. A drop of water, to return to our former example, may be divided into a certain number, and no more, of portions similar to each other. Each of these the modern chemist calls a molecule of water. But it is by no means an atom, for it contains two different substances, oxygen and hydrogen, and by a certain process the molecule may be actually divided into two parts, one consisting of oxygen and the other of hydrogen. According to the received doctrine, in each molecule of water there are two molecules of hydrogen and one of oxygen. Whether these are or are not ultimate*

¹⁹ On pourrait même écrire que l'expression ne veut rien dire. Cependant, au moment où Maxwell écrit, les concepts d'atomes, d'ions et de molécules ne sont pas clarifiés. Il en est de même de la nature de la charge électrique. Il faudra encore attendre 40 ans après Maxwell pour écrire explicitement ce qui se passe au niveau d'une électrode lors d'une électrolyse et ceci suppose que soit dégagée la notion d'électron, notion que l'on a vu s'esquisser chez Stoney et chez Helmholtz.

atoms I shall not attempt to decide »²⁰. Dans cette période de la seconde moitié du dix-neuvième siècle, la physique et la chimie ont besoin de l'hypothèse atomique pour expliquer et rassembler les faits observés. Mais il n'y a pas d'observation directe des atomes : il s'agit d'abord d'un concept utile grâce auquel différents phénomènes (électrolyse, réactions chimiques) s'interprètent ou commencent à s'interpréter. La prudence de Maxwell laisse la porte à un monde subatomique qui est celui de la physique du vingtième siècle.

6. Une meilleure compréhension des ions : Arrhénius

En 1883, Svante Arrhénius présente une thèse (publiée en 1884 à Stockholm) écrite en français dont le titre est « *Sur la conductivité galvanique des électrolytes* ». En particulier Il montre que la conductibilité électrique des « *solutions salines* » est dû au fait que lorsqu'on dissout un sel dans l'eau alors la dissolution entraîne l'existence « *d'ions* » un « *kathion* » chargé positivement et un « *anion* » chargé négativement. Il note A^+ et B^- ces ions²¹. Il affirme que tous les ions positifs possèdent la même charge et sont de même masse, il en est de même des ions négatifs. Pour un corps de type AB, si la charge de A est $+e$ (c'est la notation d'Arrhénius) alors la charge de B est $-e$. La notation utilisée a, par rapport aux textes précédents Arrhénius, l'avantage de montrer explicitement des édifices chargés et de charge individualisée, discrète, discontinue. Ceci rompt avec la notion de fluide continu²².

7. Où le vocabulaire « *électron* » apparaît

Le mot *électron* apparaît dans un long article de Stoney de juillet 1891 [26]. Stoney revient sur ses écrits de 1874-1881 concernant l'électrolyse et où il introduisait une charge E_1 . Il ajoute « *A charge of this amount is associated in the chemical atom with each bond. There may accordingly be several such charges in one chemical atom, and there appear to be at least two in each atom. These charges, which it will be convenient to call electrons, cannot be removed from the atom; but they become disguised when atoms chemically unite.* » (page 583). Outre le fait qu'il ne justifie pas le nom donné d'électron, il n'explique pas non plus pourquoi chaque atome doit posséder deux électrons ou pourquoi

²⁰ Il s'agit en fait d'un texte issu d'une conférence donnée devant « *the British Association* » à Bradford.

²¹ Arrhénius étend son raisonnement à certains acides et à certaines bases, concepts qui seront à leur tour élargis par Bronstedt au XX^{ème}.

²² Les distributions linéique, surfacique ou volumique de charge étaient déjà bien présentes en électromagnétisme : il s'agissait de grandeurs continues qui sont intégrables sans problème.

il est impossible de l'extraire de l'atome²³. Plus loin (page 584) il parle du mouvement d'un électron sur une orbite ce qui laisse à croire qu'il considère l'électron comme un objet soumis aux lois de la mécanique et dès lors possédant une masse. En réponse à un article d'Ebert paru en septembre 1894 dans «Philosophical Magazine », concernant notamment un article de Helmholtz sur le phénomène d'électrolyse, Stoney clame son antériorité dans la reconnaissance de l'aspect discontinu de l'électricité et dans la valeur d'une charge qu'il désigne depuis 1891 sous le vocabulaire d'électron. Cependant en examinant précisément ce qui est écrit, il apparaît que si le mot électron apparaît bien sous la main de Stoney, sa signification physique ne peut lui être attribué. Ce point de vue est analogue à celui exprimé par Robert Nola [27] notamment dans son paragraphe 7 intitulé « The term "Electron" and its multiple introductions in physics »²⁴.

En 1893-1894 Larmor introduit également le vocabulaire électron. [28]. Comme l'écrit Olivier Darrigol [29]: « *Larmor's writings were notoriously difficult to read* : » et plus loin : « *Larmor seems to have been unable to express himself concisely, even on straightforward matters. This verbal generosity reflected in good part his way of thinking, which involved much historical and philosophical digression. In brief, Larmor was neither a practical man nor a rigorous thinker. He was a natural philosopher.* ». La partie 125 est écrite fin 1893 puis complétée en juin 1894 par une section, située après la conclusion, appelée « introduction of free electrons ». C'est pour expliquer les interactions entre aimants permanents que Larmor introduit ces électrons en faisant référence à l'appellation de Stoney (il s'agit de l'article de 1891). En fait il s'agit essentiellement d'interpréter des expériences liées au champ magnétique (effet Hall, effet Zeeman) et de discuter la dispersion de la lumière dans les milieux matériels. Larmor a besoin de charges électriques et de leurs mouvements. Dans la conclusion de la partie 1, Larmor écrit (§113) : « *The chief result of the discussion is that a rotationally elastic fluid aether gives a complete account of the phenomena of optical transmission, reflexion, and refraction, in isotropic and crystalline media, coinciding in fact formally in its wider features with the electric theory of light* ». Il revient sur l'interprétation du courant électrique en terme de circulation de charges dans la partie 2 écrite en 1895 (cet article est beaucoup plus court que le précédent, 49

pages « seulement ». Un des points importants est donné dès l'introduction :

« *As a preliminary, it is maintained that a dynamical theory of electric currents, based on the ordinary conception of a current-element, must lead to expressions for the electrodynamic forces which are at variance with the facts. On the other hand, a theory which considers moving electrons to be the essential elements of the true currents in material media, gives a definite account of the genesis and the mutual relations of both type of force, the electromotive and the ponderomotive, and gives formulae for them, which corresponds in the main with those originally deduced by Maxwell....* ». Cependant, Larmor, dans le troisième article²⁶ de 1897, écrit dans l'introduction, à propos de l'éther: « *In this medium unitary electric charges, or electrons, exists as point singularities, or centres of intrinsic strain, which can move about under their mutual actions ; while atoms of matter are in whole or in part aggregations of electrons in stable orbital motion.* ». Dans un livre paru en 1900 [30] Larmor enfonce le clou « *An electron will occur in this analysis as a singular point in the aether, on approaching which the elastic strain constituting the aethereal displacement increases indefinitely*²⁷... *It is in fact analogous to what is called a simple pole in the two-dimensional representation that is employed in the theory of a function of a complex variable* ». Avec une telle conception, provenant du fait que Larmor essaye de concilier la théorie dominante de l'éther avec la notion encore récente en 1900 de l'électron, il est difficile de reconnaître à Larmor un rôle précurseur dans la connaissance de la nature du courant électrique ou dans la conceptualisation de la notion d'électron.

8. Où la quantification de l'électricité apparaît clairement

Lodge s'intéresse aussi à la conduction électrique [31] et son introduction est typique de la pensée des physiciens de l'époque pour qui tout doit être expliqué en des termes mécaniques ; il écrit en tout début de l'avertissement : « *The object of this work is to explain without technicalities, and to illustrate as far as possible by mechanical models and analogies, the position of thinkers on electrical subjects at the present time.* ». De même, toute la physique est engluée dans le concept d'éther et Lodge affirme le classicisme de sa pensée dans l'introduction « *The doctrine expounded in this*

²³ Dès lors il est difficile de voir en Stoney un grand découvreur de l'électron ou même en défricheur de ce concept. En effet de nombreux travaux sur les rayons cathodiques sont déjà disponibles avant 1890 avec Geissler, Plücker, Hittorf, Goldstein, Crookes, Hertz pour ne citer que les principaux protagonistes de ce type de recherche. Il faut également noter que Hittorf a publié sur la conductivité des électrolytes dans les années 1850.

²⁴ Un des arguments de Nola mérite d'être cité : « *In the case of individuals the proper name "John Smith" is unproblematically ambiguous in denoting many different*

people. Similarly for names for scientific kinds, observable and unobservable. This is so of the term "electron". ». Nola cite également les travaux de Arabatzis (2001), Falconer (1987, 2001) et Kragh (2001) discutant l'origine du nom électron et de sa « découverte ».

²⁵ La longueur de cet article est remarquable : l'article s'étend de la page 719 à la page 822.

²⁶ Cette troisième partie occupe 97 pages.

²⁷ Le texte original contient alors deux formules ...qui n'aident en rien à la compréhension physique et qui sont omises ici.

book is the ethereal theory of electricity. Crudely one may say that as heat is a form of energy, or a mode of motion, so electricity is a form of ether, or a mode of ethereal manifestation. ». Néanmoins son approche de l'électrolyse est une base pour la compréhension future de la nature du courant électrique. Il écrit : « *The present state of our knowledge enables us to make the following assertions with considerable confidence of their truth :*

(1) *Electrolytic conduction is invariably accompanied by chemical decomposition, and in fact only occurs by means of it.*

(2) *The electricity does not flow through but with, the atoms of matter, which travel along and convey their charges something after the manner of pith balls.*

(3) *The electric charge belonging to each atom of matter is a simple multiple of a definite quantity of electricity, which quantity is an absolute constant quite independent of the nature of the particular substance to which the atoms belong.*

(4) *Positive electricity is conveyed through a liquid by something equivalent to a procession of the electropositive atoms of the compound, in the direction called the direction of the current ; and at the same time negative electricity is conveyed in the opposite direction by a similar procession of the electronegative atoms.*

(5) *On any atom reaching an electrode it may be forced to get rid of its electric charge, and, combining with others of the same kind, escape in the free state ; in which case visible decomposition results. Or it may find something else handy with which to combine say on the electrode or in the solution; and in that case the decomposition, though real, is masked, and not apparent. . ».*

Le point 3 est absolument important puisqu'il décrit la nécessité pour une charge d'être un multiple, sous-entendu entier, d'une charge électrique. La relation entre le fait que la matière soit discontinue (atome) et le fait que « l'électricité » également est bien claire, au moins pour Lodge en 1889.

9. Apport de Jean Perrin

Après avoir abordé la conduction électrique dans les solides, les notions de conducteurs et d'isolants électriques sont déjà connues au temps d'Ampère, puis dans les liquides conducteurs, par le biais du phénomène d'électrolyse (cf supra), L'étude de la conduction électrique dans les gaz est entreprise à partir du milieu du dix-neuvième siècle. La mise en évidence des

« rayons cathodiques » par Hittorf²⁸ en 1869 est le prélude à de nombreuses recherches qui vont conduire à la caractérisation d'un corpuscule électrisé isolé, l'électron. Un nom émerge dans la plupart des écrits sur les rayons cathodiques est celui de Joseph John Thomson. En 1893 il donne une justification de ses recherches : « *The phenomena attending the electric discharge through gases are so beautiful and varied that they have attracted the attention of numerous observers. The attention given to these phenomena is not, however, due so much to the beauty of the experiments, as to the widespread conviction that there is perhaps no other branch of physics which affords us so promising an opportunity of penetrating the secret of electricity; for while the passage of this agent through a metal or an electrolyte is invisible, that through a gas is accompanied by the most brilliantly luminous effects, which in many cases are so much influenced by changes in the conditions of the discharge as to give us many opportunities of testing any view we may take of the nature of electricity, of the electric discharge, and of the relation between electricity and matter*» [32]. Thomson caractérise le corpuscule électrisé, qu'il n'appelle pas électron y compris lors de son discours de réception du prix Nobel, par le rapport charge sur masse en 1897. Parmi les contributeurs aux recherches sur les rayons cathodiques il y a Jean Perrin qui peut proposer avant 1897, grâce à ses connaissances en physique et en chimie, une unification des observations sur les rayons cathodiques et sur l'électrolyse²⁹. En 1893 Perrin montre expérimentalement que les rayons cathodiques sont chargés négativement et sont déviés par un aimant [33]. Dans sa conclusion il écrit : « *Au voisinage de la cathode, le champ électrique est assez intense pour briser en morceaux, en ions, certaines des molécules du gaz restant. Les ions négatifs partent vers la région où le potentiel croît, acquièrent une vitesse considérable, et forment les rayons cathodiques ; leur charge électrique et, par suite, leur masse (à raison d'une valence-gramme pour 100 000 coulombs est facilement mesurable* ». Il n'écrit donc pas le mot « électron » et rien n'indique pourquoi la masse de ces « ions négatifs » n'est pas mesurée si cela était si facile. Par contre il est vrai que le passage d'une charge de 100 000 coulombs (en fait il s'agit d'environ 96500 coulombs) correspond à une « valence-gramme » c'est-à-dire à une mole d'électrons (en utilisant le langage actuel). C'est le mérite de Thomson qui va déterminer le rapport charge sur masse en modifiant le dispositif expérimental de Perrin en 1897³⁰. Au-delà de cet article de recherche souvent cité, un texte publié en 1901 [34] est précurseur

²⁸ Avant Hittorf en 1869 il faut citer Plücker et Geissler qui furent aussi impliqués dans ce type de recherche.

Auparavant, Hittorf publia une série de textes concernant la migration des ions dans les électrolytes durant les années 1853 à 1859. Après Hittorf, de nombreux physiciens tels que Goldstein, Crooks, Shuster, Lenard et Hertz s'intéressèrent également aux rayons cathodiques.

²⁹ L'étude des rayons cathodiques mobilise de nombreux physiciens et pendant plus de trente ans. Il s'agit d'un déplacement d'électrons libres dans une atmosphère

gazeuse sous faible pression, ce qui constitue bien un courant électrique au sens actuel. Cependant ce courant étant éloigné des applications électriques de la fin du XIX et du début du XX, la suite de l'article ne s'étend pas sur la physique sous-jacente à ce phénomène.

³⁰ En juin 1897, Jean Perrin obtient devant la faculté des sciences de l'université de Paris le doctorat ès sciences physiques avec une thèse intitulée « Rayons cathodiques et rayons de Röntgen. Étude expérimentale. »

dans la mesure où il réalise la synthèse de recherches concernant de nombreux phénomènes physiques qui permettent de « prouver » la réalité atomique et de donner une valeur à la charge de l'électron, même si, comme Thomson, il n'utilise pas ce terme et conserve le mot « corpuscule ». En utilisant d'une part des lois de l'électrolyse (la « valence gramme » de 100 000 coulombs environ) et, d'autre part, la mesure du nombre d'Avogadro³¹ il estime la valeur de la charge élémentaire. A partir d'expériences sur des gaz auxquelles on applique la théorie cinétique de Maxwell il obtient pour le nombre d'Avogadro la valeur estimée de $5.5 \cdot 10^{23}$ ce qui constitue une erreur de 8% environ par rapport à la valeur retenue actuellement. Il donne pourtant la valeur approchée de 10^{-20} coulomb pour la charge élémentaire alors que suivant les valeurs précédentes il aurait dû donner $1.8 \cdot 10^{-19}$ coulomb (en divisant 100 000 par $5.5 \cdot 10^{23}$ mais il ne précise pas dans la conférence qu'il fait cette division pour obtenir la valeur de la charge) ce qui est plus proche de la valeur retenue aujourd'hui ($1.6 \cdot 10^{-19}$ coulomb). Jean Perrin a sans doute conscience que la valeur de son nombre d'Avogadro est entachée d'erreur et ne donne qu'un ordre de grandeur ; en conséquence il ne donne pas une grande précision sur la charge. Ce texte est issu d'une conférence « faite aux étudiants et aux Amis de l'Université de Paris, le 16 février 1901, par M. Jean Perrin, chargé du cours de Chimie physique à la Sorbonne »³². Le caractère pédagogique lié à la clarté du propos est étonnante pour l'époque notamment en France car les chimistes sont encore largement anti-atomistes. Il en est d'ailleurs bien conscient car il écrit en introduction pour affirmer clairement sa position atomiste : « Aussi, malgré la haute antiquité des hypothèses moléculaires, il n'y a guère plus d'un siècle qu'elles ont pénétré dans la véritable science, en se montrant capables d'expliquer simplement certains faits connus, et d'en faire découvrir de nouveaux. En ce sens, leur rôle n'a fait que grandir, et l'on peut aujourd'hui les considérer comme un des plus puissants outils de recherche que la raison humaine ait su créer ».

10. Le Congrès de physique de 1900 et l'apport de Drude

³¹ Jean Perrin revient en 1909 sur la mesure de ce nombre, et c'est lui qui le nomme « nombre d'Avogadro » appellation toujours en vigueur, afin d'obtenir plus de précision notamment sur la valeur de la charge élémentaire. Millikan en fera une détermination plus directe également en 1909.

³² Après l'obtention de sa thèse, Jean Perrin candidate en 1898 à un poste de chargé de cours de chimie physique et son rapporteur pour l'obtention de ce poste est Henri Poincaré qui écrit entre autre « En résumé, autant qu'on en peut juger par ces premiers travaux, M. Perrin est doué du don le plus précieux pour le physicien ; il sait imaginer l'expérience cruciale, qui rejette dans l'oubli vingt expériences imparfaites et fait luire la lumière définitive là

Paul Drude propose en 1900 un modèle pour la conduction électrique dans les métaux. Plus précisément, au congrès international de physique en 1900 organisé par la société française de physique, congrès réuni à Paris en parallèle à la grande exposition universelle, Drude propose une étude de la dispersion de la lumière par certains matériaux [35]³³. Cet article est un extrait de son livre « Lehrbuch der Optik » publié en janvier 1900 à Leipzig. Dans cet article le modèle de l'électron élastiquement lié est présenté et les valeurs de l'indice de réfraction sont discutées. Même si Drude est prudent dans sa conclusion : « J'ai indiqué dans ce qui précède le sens dans lequel peut être développée, à mon avis, une théorie fructueuse de la théorie des métaux, et dans lequel je chercherai à la développer. Je n'ai pas pu encore étendre assez mes calculs pour pouvoir affirmer que la théorie des électrons, sous la forme que je lui ai donnée, rend compte de tous les faits connus. En tout cas, jusqu'ici la comparaison avec les résultats qu'on en déduit avec ceux des expériences n'a conduit à aucune contradiction... ». Pour Drude il semble établi que la conduction électrique dans les métaux est liée à une circulation ordonnée des électrons. Il faut également noter l'affirmation nette concernant les électrons ce qui doit être rapproché dans l'aspect balbutiant de Thomson ou de Perrin concernant ces particules. Néanmoins le vocabulaire est bien aussi tributaire de l'époque quand il écrit « l'intensité du courant j (il s'agit du vecteur densité de courant) se compose alors du courant de conduction, du courant de déplacement dans l'éther.. », puisque l'éther règne alors encore sur le monde de la physique. Le travail de Drude est bien reconnu par la communauté des physiciens. Par exemple Hendrick Antoon Lorentz démontre l'intérêt du travail de Drude lors du congrès Solvay de 1924 [36]³⁴ : « Nous pouvons commencer par la belle théorie sur les conductibilités électrique et calorifique que Drude publia en 1900. Selon les idées de ce physicien, un courant électrique dans un métal consiste dans le transport d'électrons libres qui se meuvent dans les interstices intermoléculaires, l'électricité positive, qui est attachée aux atomes, restant en repos. ».

En revenant à la pile Volta, on pourrait donc considérer que dans la partie fil électrique du système, il est connu en 1900 que le passage du courant électrique est interprété au niveau élémentaire. Toujours lors du même congrès Lucien Poincaré, cousin germain d'Henri Poincaré, propose un article sur la pile Volta [37]. Il

où elles avaient laissé le doute ». Jean Perrin obtient le poste malgré la présence de Pierre Curie comme candidat.

³³ L'article de Drude est écrit en allemand et est traduit par un maître de conférences de la faculté des sciences de Rennes, Ch Maurain.

³⁴ Le texte donné fait partie d'une biographie de Lorentz [Jean-Jacques Samuëli, Jean-Claude Boudenot, H.A. Lorentz. La naissance de la physique moderne, Paris : Ellipses, 2005] qui montre son rôle à la fois dans le développement des théories physiques et aussi dans l'essor de la coopération internationale scientifique. Il est également disponible dans Collected Papers, Vol 8, p 263, Springer, 1935

s'interroge sur l'origine de la force électromotrice d'une pile et de l'énergie délivrée par la pile lorsqu'elle alimente un circuit. C'est la chimie qui donne la réponse.

11. Les travaux des chimistes pour finir le travail

Est-ce que Volta avait reconnu que sa pile fonctionnait grâce à une réaction chimique ou bien le simple contact entre deux métaux différents suffisait-il ? La réponse n'est pas simple [38]. En tout cas les phénomènes se produisant au niveau des électrodes, qui sont des réactions chimiques d'oxydo-réduction, seront reconnus comme tels et décrits par des chimistes au début du vingtième siècle mais après beaucoup de tâtonnements. Cette question n'a pas fortement intéressé les historiens des sciences³⁵. Une brève étude assez récente donne un point de vue historique [39]. Un ouvrage de 1907 est cité [40] et donne une définition presque moderne : « *The oxidation of any body may, then, consist in the addition of the atoms of a negative element to its molecules, atoms, or ions, or the withdrawal of the atoms of a positive element; or it may consist in the addition of positive charges of electricity, or the withdrawal of negative charges. Reduction is the reverse of this...* ». Dans la seconde édition de ce livre qui date de 1915, et qui est accessible, si les ions sont correctement décrits, il n'est pas question d'électrons. Le sous-titre de cet ouvrage est « *An elementary treatise for the use of students of chemistry* » : les étudiants n'étaient-ils pas encore préparés à la notion d'électron ? Ou bien cette notion était jugée trop récente³⁶. Alexander Smith en 1915 [41] affirme d'une part (p145-146) : « *A negative charge on an atom of an element means that an electron has been added to the atom. A positive charge means that an electron has been taken from a neutral atom, leaving it positive. Thus an ion of chlorine (Cl⁻) is equivalent to an atom plus an electron (Cl+ ϵ), an ion of hydrogen, an atom minus an electron (H- ϵ). When these two ions combine, a neutral molecule of HCl is formed.* » et, d'autre part (p238) : « *we reach the briefest definition by saying: oxidation is removing electrons and reduction is adding electrons.* »³⁷. Mais aucune pile n'est étudiée dans ce livre écrit par un professeur de chimie de Columbia University. En 1922 Fritz Foerster [42] décrit la pile Daniell à la fois par des équations à chaque électrode mettant en jeu ions et charges positives ou négatives, mais il ne parle pas

d'électrons, et par une réaction globale. Enfin en 1926, Dewitt T Keach [43] écrit des demi équations électroniques mettant en jeu des électrons.

12. Conclusion

La nature de l'électricité est inséparable de la nature discontinue de la matière. L'histoire a divisé les sciences physiques en deux parties que sont la physique et la chimie. Ces deux communautés, même si elles partageaient parfois le même vocabulaire n'y mettaient forcément les mêmes significations. Ainsi l'atome du physicien, en fait il serait plus juste d'écrire les atomes des physiciens tant est grande la disparité de vue sur ce concept au dix-neuvième siècle, et l'atome du chimiste (id.) ne recouvrent pas la même signification. Les programmes scientifiques des deux communautés va nettement diverger et ne plus se recouvrir vers la fin du dix-neuvième siècle : les rayons cathodiques, le problème de l'éther, l'électromagnétisme et ces applications ainsi que le rayonnement électromagnétique pour les uns et des produits toujours nouveaux à synthétiser pour les autres. Cependant la compréhension de la nature du courant aurait été un élément de programme réunissant les deux communautés à travers l'étude des piles électriques. Le vocabulaire utilisé (molécules, atomes, ions) n'a pas été clairement explicité avant la fin du dix-neuvième siècle, ce qui a permis à Stoney de clamer son antériorité dans l'élaboration du concept d'électron. Ce concept se mettra en place lentement, avec de nombreux auteurs pouvant réclamer à juste titre un rôle dominant. Il n'est pas non plus nécessaire d'attendre Millikan [44] pour avoir une valeur de la charge de l'électron et de ce point de vue il a été souligné que Jean Perrin, au-delà du rôle reconnu pour ces recherches sur les rayons cathodiques, a proposé en 1901 une valeur numérique de bonne précision. La nature des ions a réellement été dégagée à partir d'Arrhénius ce qui permet de comprendre, avant 1900, la nature du courant électrique dans les liquides conducteurs. Ainsi la compréhension totale de la nature du courant électrique, comme circulation ordonnée de porteurs de charges, vue à travers le prisme de l'électrochimie, aurait été possible pratiquement au tout début du vingtième siècle.

13. REFERENCES

[1] Georges Claude, L'électricité à la portée de tout le monde, Paris : Dunod, 1905

11-31, 2000]. Il est montré que dès 1908, l'électron fait son apparition.

³⁷ Par contre la réaction chimique traduisant l'électrolyse du chlorure de sodium est écrite globalement sans faire référence à ce qui se passe au niveau de chaque électrode : $2\text{NaCl} + 2\text{H}_2\text{O} + \text{Elect.} \rightarrow \text{H}_2 + \text{Cl}_2 + 2\text{NaOH}$. Le rôle du courant électrique n'est visiblement pas encore saisi alors que les définitions des réactions chimiques d'oxydation et de réduction sont totalement modernes. De plus, l'écriture en terme d'ions n'est pas encore d'actualité.

³⁵ Par exemple Isobel Falconer [I. Falconer (2006), A point in common: the electron in chemistry and physics, Atti del XI Convegno Nazionale di Storia e Fondamenti della Chimica, Rendiconti della Accademia Nazionale delle Scienze detta dei XL, series 5, vol 24, p. 445-460] n'examine pas le fonctionnement d'une pile, objet qui peut être considéré comme relevant à la fois de la physique et de la chimie.

³⁶ Pour les lycéens français la référence suivante discute ce point : [Jean-Michel Dusseau & Pierre Fréchengues, Introduction de l'électron dans l'enseignement secondaire français, vue à travers quelques manuels Didaskalia, n 16, p

[2] Par exemple voir Bernadette Bensaude-Vincent, Isabelle Stengers, *Histoire de la chimie*, Paris, La Découverte, 1993

[3] André-Marie Ampère, *Mémoire présenté à l'Académie royale des Sciences sur les effets des courans électriques*, *Annales de chimie et de physique*, vol. 15, p. 59-76, 1820.

[4] Par exemple voir Louis Figuier, *Les merveilles de la science*, p. 598-706, Paris: Furne, Jouvet et Cie, 1867.

[5] Par exemple voir Hans-Christian Ørsted, *Expériences sur l'effet du conflit électrique sur l'aiguille aimantée*, annotations par Arago, *Annales de Chimie et de Physique*, tome 14 p. 417-425, 1820; traduction en français de « Experimenta circa effectum conflictus electrici in acum magneticam », *Journal für Chemie und Physik*, p. 275-281, juillet 1820.

[6] Jean-Michel Dusseau, Pierre Fréchengues, *Introduction de l'électron dans l'enseignement secondaire français, vue à travers quelques manuels*, *Didaskalia*, vol 16, p. 11-31, 2000.

[7] Par exemple voir David L. Anderson, *The discovery of the electron. The atomic concept of electricity*, Princeton : Van Nostrand Company, 1964.

[8] Paul Drude, *Théorie de la dispersion dans les métaux fondée sur la considération des électrons*, in *Rapports présentés au congrès international de physique*, Vol. 3, p. 34-46, Paris : Gauthier Villars, 1900

[9] Par exemple voir Theodore Arabatzis, *Rethinking the « discovery » of the electron*, *Stud. Hist. Phil. Mod. Phys.*, Vol. 21, No. 4, p. 405-435, 1996

[10] Joseph J Thomson, *Carriers of negative electricity*, Nobel Lecture, December 11, 1906.

[11] Alexander Volta, *On the electricity excited by the mere contact of conducting substances of different kinds.*, *Phil. Trans. R. Soc. Lond.* 90, p. 403-431, 1800.

[12] William Nicholson, *Account of the new Electrical or Galvanic Apparatus of Sig. Alex. Volta, and Experiments performed with the same*, *The Journal of Natural Philosophy, Chemistry & the Art*, Vol. 4, p. 179-187, 1801.

[13] Eleuthere Mascart, Jules Joubert, *Leçon de l'électricité et le magnétisme*, p. 276, Tome 1, Paris : Masson 1882.

[14] Michael Faraday, *Experimental researches in electricity*, vol1, London: Bernard Quaritch, 1839.

[15] Christine Blondel, Bertrand Wolf <http://www.ampere.cnrs.fr/parcourspedagogique/zoom/faraday/electrolyse/index.php>

[16] John W. S. Rayleigh et Eleanor M. Sidgwick, *On the electro-chemical equivalent of silver and on the absolute electromotive force of Clark cells*, *Proceedings of the Royal society of London*, 232, p. 142-146, 1884. L'article est signé H. Sidgwick pour Henry, prénom de son époux.

[17] Hermann Von Helmholtz, *On the modern development of Faraday's conception of electricity*, *Science*, Issue 44, p. 182-185, 1881.

[18] Olivier Darrigol, *The Voltaic Origins of Helmholtz's Physics of Ions in Fabio Bevilacqua and Enrico Gianetto (eds), Volta and the history of electricity*, p. 2-16, Milano: Hoepli, 2003.

[19] Voir par exemple Bernadette Bensaude Vincent « Languages in chemistry .», in Mary Jo Nye ed., *The Cambridge History of Science*, vol V, p. 174-190. *Modern Physical and Mathematical Sciences*, Cambridge, Cambridge : University Press, 2003.

[20] James G O'Hara, George Johnstone Stoney 1826–1911, in *Physicists of Ireland. Passion and Precision*, Edited by Mark McCartney and Andrew Whitaker, IOP Publishing Ltd, 2003

[21] Par exemple voir Asim O. Barut, *Brief History and Recent Developments in Electron Theory and Quantum electrodynamics*, in D. Hestenes, A. Weingartshofer, *The Electron. New theory and experiment*, vol 45, Springer & Dordrecht, 1991

[22] George J. Stoney, *On the Physical Units of Nature.* *Philosophical Magazine* 11, 381–390, 1881.

[23] George J. Stoney, *On the Physical Units of Nature*, *The scientific proceedings of the Royal Dublin Society*, Tome 3, p. 51-60, 1883.

[24] James C. Maxwell, *Traité d'électricité et de magnétisme*, tome 1, Paris : Jacques Gabay, 1889

[25] James C. Maxwell, *The theory of molecules*, *Popular Science Monthly*, p276-290, janvier 1874

[26] George J. Stoney, *On the cause of double lines and equidistant satellites in the spectra of gases*, *The scientific transactions of the Royal Dublin Society*, vol. IV, p. 563-608, 1891

[27] Robert Nola, *The optimistic meta-induction and ontological continuity: the case of the electron*, in *Rethinking scientific change and theory comparison : stabilities, ruptures, incommensurabilities?*, edited by Lena Soler, Howard Sankey, Paul Hoyningen-Huene, Springer 2008.

[28] Joseph Larmor, *A Dynamical Theory of the Electric and Luminiferous Medium. Part I, Part II Theory of Electrons; Part III Relations with Material Media*, *Philosophical Transactions of the Royal Society A*, Vol 185, p 719-822, 1894; Vol 186, p695-743, 1895; Vol. 190, p. 205-300, 1897

[29] Olivier Darrigol, *The Electron Theories of Larmor and Lorentz: A Comparative Study*, *Historical Studies in the Physical and Biological Sciences*, Vol. 24,p. 265-336, 1994.

[30] Joseph Larmor, *Aether and matter. A Development of the dynamical relations of the aether to materials systems on the basis of the atomic constitution of matter*, Cambridge: University Press, 1900.

[31] Oliver J. Lodge, *Modern views of electricity*, Londres: Macmillan and Co, 1889.

[32] Joseph J. Thomson, *Notes on Recent Researches in Electricity and Magnetism*, p 189, Oxford: Clarendon Press, 1893.

[33] Jean Perrin, *Nouvelles propriétés des rayons cathodiques*, *Comptes rendus de l'académie des sciences*, Vol. 121, p. 1130-1133, 1893.

[34] Jean Perrin, *Les hypothèses moléculaires*, *Revue scientifique*, Tome 15, p. 449-461, 1901.

[35] Paul Drude, *Théorie de la dispersion dans les métaux fondée sur la considération des électrons*, in *Rapports présentés au congrès international de physique*, Vol. 3, p. 34-46, Paris: Gauthier Villars, 1900.

[36] Hendrick. A. Lorentz, applications de la théorie des électrons aux propriétés des métaux, Rapport à la réunion Solvay, avril 1924, Paris:Gauthier-Villard, 1927.

[37] Lucien Poincaré, Quelques remarques sur les théories de la pile voltaïque, in Rapports présentés au congrès international de physique, Vol. 2, p. 403-421, Paris: Gauthier Villars, 1900.

[38] Valeria Mosini, When chemistry entered the pile in: Bevilacqua, Fabio and Fregonese, Lucio, (eds.) Nuova Voltiana. Università di Pavia, Milan, Italy, p. 117-132, 2003.

[39] William B. Jensen, The Origin of the Oxidation-State Concept, Journal of Chemical Education, Vol. 84, p. 1418-1419, 2007

[40] Henry P. Talbot, Arthur A. Blanchard, The Electrolytic Dissociation Theory with Some of Its Applications, p 54, New York: Macmillan, 1907.

[41] Alexander Smith, A text book of elementary chemistry London: Bell and sons, 1915.

[42] Fritz Foerster, Elektrochemie Wässriger Lösungen, Leipzig : Von Johann Ambrosius Barth, 1922.

[43] Dewitt T. Keach, The electron in oxidation-reduction, Boston Ginn and Co, 1926.

[44] Robert A. Millikan, A new modification of the cloud method of determining the elementary electrical charge and the most probable value of that charge. Philosophical Magazine, Vol. 19, p. 209 –228, 1910.

Genèse de la pile Volta et les courants galvaniques

Deuxième partie : LA CORROSION GALVANIQUE

Jean-Jacques ILARY
 Professeur de Physique/Chimie à la retraite
 LGT de Mirepoix – Route de Limoux – 09500 Mirepoix

Résumé : Voilà déjà plus de deux cents ans que Volta présenta sa pile. Si elle fut essentielle pour la découverte des lois fondamentales de l'électricité, elle a été rapidement supplantée par les générateurs basés sur l'électromagnétisme. Dans la mémoire collective, son souvenir reste confiné dans les ouvrages scolaires. Mais actuellement, souvent « cachée », elle fait partie de notre quotidien. Si on conçoit un dispositif, comportant un ou deux métaux, en présence d'un liquide conducteur, la pile Volta réapparaît en entraînant une corrosion métallique.

1. Introduction

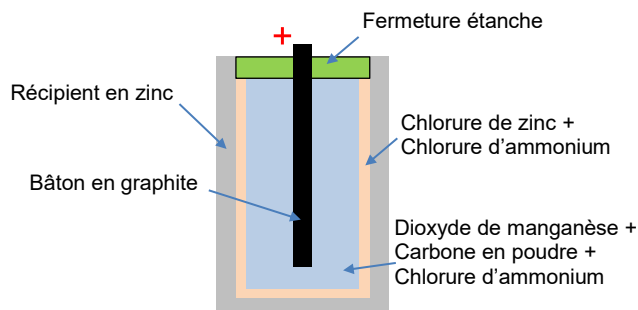
Au cours de la première partie de cet article, nous avons vu que la pile Volta a constitué une découverte capitale pour « l'explosion » de l'aventure électrique. Mais le fonctionnement de ce générateur entraîne la polarisation d'un des métaux et la corrosion de l'autre métal. Le développement du télégraphe, puis celui du téléphone firent apparaître un besoin urgent de disposer de sources de courant, plus sûres et plus constantes.

En 1836, un chimiste anglais John DANIELL, crée une pile IMPOLARISABLE. Mais elle utilisait des récipients contenant des liquides, était donc, difficilement transportable.

En 1867, un chimiste français Georges LECLANCHE réalise une pile utilisant un DEPOLARISANT. C'est la pile saline que nous utilisons, encore de nos jours. D'autres modèles furent proposés, mais si chacun d'eux apportait une solution à la polarisation, aucun ne résolvait le problème de la corrosion métallique.

2. Fonctionnement d'une pile

L'exemple choisi sera une pile type Leclanché. Pourquoi ce choix ? Première raison, c'est le modèle, encore utilisé actuellement pour les piles salines. Les piles alcalines, plus performantes que les précédentes, présentent la même structure mais utilisent des sels de métaux alcalins (potassium, lithium). Deuxième raison, elle ne comporte qu'un seul métal, ce qui confirme que l'hypothèse émise par Volta était bien erronée.

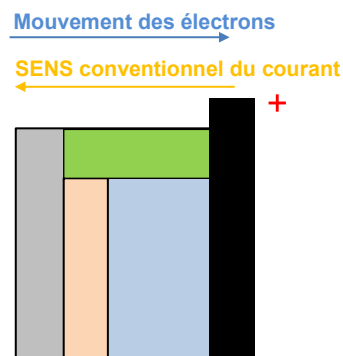


Les atomes du zinc qui constituent le récipient, ont tendance à perdre deux électrons, pour donner des ions Zn^{2+} solubles. En revanche le dioxyde de manganèse a tendance à capter des électrons.

Pourquoi n'y a-t-il pas de réaction entre ces deux réactifs quand les bornes de la pile ne sont pas reliées ?

Si au départ quelques atomes de zinc ont pu passer à l'état d'ions Zn^{2+} , ceux-ci vont créer une zone positive autour du métal ce qui va s'opposer la migration des électrons. La réaction s'en trouve rapidement interrompue. Si bien que la marque Wonder en fera son slogan publicitaire : « ne s'use que si l'on s'en sert ».

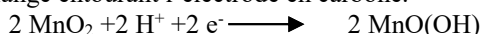
Que se passe-t-il lorsqu'un conducteur relie les deux bornes de la pile ?



Côté zinc les atomes de ce métal perdent chacun 2 électrons. On dit que le zinc est oxydé



Ces électrons émis vont migrer à travers le circuit électrique extérieur, pour aller réagir avec les produits du mélange entourant l'électrode en carbone.



Le dioxyde de manganèse a été réduit. Le rôle du chlorure d'ammonium est d'acidifier le milieu réactionnel. Le fonctionnement de la pile va entraîner une usure du zinc, qui constituant le récipient étanche, finira par ne plus assurer sa fonction. Il peut s'en suivre des coulures de liquide très corrosif, pouvant provoquer de graves dégâts dans les circuits électroniques alimentés.



Pile 4,5 V usagée

3. Les couples Oxydant/Réducteur.

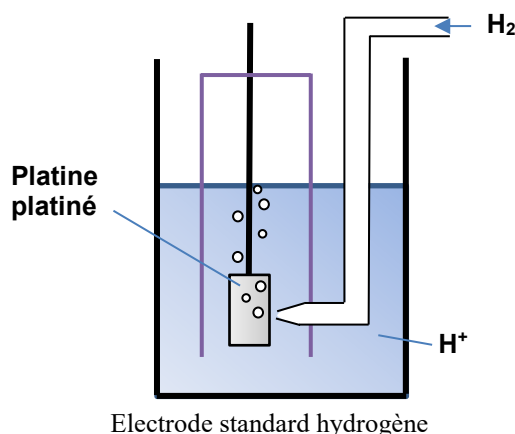
Dans le langage courant, on appelle oxydation le phénomène de corrosion lié à l'action de l'oxygène. Actuellement, en chimie, on a généralisé la notion d'oxydation aux réactions au cours de laquelle un réactif PERD un ou plusieurs électrons. La réaction inverse, appelée réduction, correspond donc à un gain d'un ou plusieurs électrons.

Dans la pile précédente, l'élément Zn a été oxydé, et s'est comporté en réducteur. Dans d'autres conditions expérimentales, (ex. électrolyse) l'ion Zn²⁺ peut être réduit en Zn et se comporter en oxydant. Le couple Zn/Zn²⁺ constitue un couple Réducteur/Oxydant appelé encore couple REDOX. Cet ensemble constitue une DEMI-PILE. Si dans des conditions convenables nous associons deux demi-piles, nous réalisons ainsi une pile dont la force électromotrice sera fonction des couples REDOX en présence.

Il a paru judicieux d'établir un classement, pour caractériser le caractère plus ou moins électropositif ou électronégatif des couples redox. Cette échelle peut être utile dans le choix des couples à retenir pour réaliser une pile de f.e.m. importante (choix du Lithium Li/Li⁺). Dans d'autres cas, un choix judicieux des couples conduira à une f.e.m. faible ce qui évitera une corrosion excessive du métal en anode ; ou permettra de placer en cathode le métal à protéger.

Comme pour toute origine de potentiel (gravitationnelle, électrique) l'origine des potentiels d'oxydo-réduction ne peut être qu'arbitraire. On a choisi comme origine le potentiel d'une électrode de référence, l'électrode standard hydrogène : ESH.

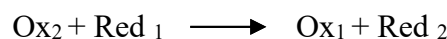
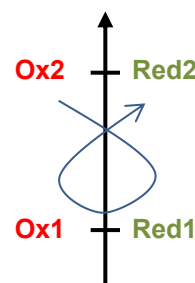
Par définition, le potentiel oxydoréduction de l'ESH est égal à zéro.



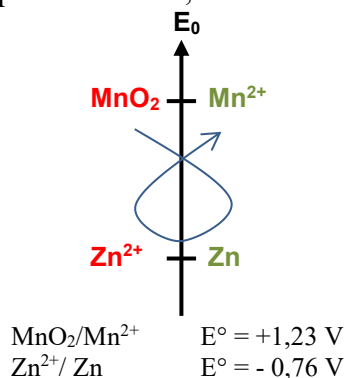
En associant un couple Redox à l'électrode standard hydrogène, on réalise une pile dont il est possible de mesurer la f.e.m. La valeur obtenue sera appelée Potentiel d'Oxydo-réduction du couple étudié et notée E°.

OXYD	E°	REDUC
Au ³⁺	+1,50	Au
PbO ₂	+1,45	Pb ²⁺
MnO ₂	+1,23	Mn ²⁺
O ₂	+1,22	H ₂ O
Hg ²⁺	+0,85	Hg
Ag ⁺	+0,80	Ag
Cu ²⁺	0,34	Cu
H ⁺	0,00	H ₂
Pb ²⁺	-0,13	Pb
Sn ²⁺	-0,14	Sn
Ni ²⁺	-0,23	Ni
Fe ²⁺	-0,44	Fe
Zn ²⁺	-0,76	Zn
Al ³⁺	-1,66	Al
Li ⁺	-3,05	Li

Pour deux couples Redox, associés dans des conditions convenables, cette échelle de valeurs, permet de prévoir le sens des échanges d'électrons, et par suite le sens du courant galvanique produit. L'oxydant le plus fort réagit avec le réducteur le plus fort. Les réactifs obtenus sont le réducteur le plus faible et l'oxydant le plus faible. La règle du gamma fléché permet de mémoriser le sens de la réaction.



Pour la pile Leclanché, on aurait :



Ces valeurs de potentiel Redox données dans le tableau, établies à 25° C, n'ont qu'une valeur théorique. Elles permettent de prévoir le sens de l'attaque, mais on ne peut pas en déduire l'importance du courant galvanique produit. Si son intensité est bien fonction de la f.e.m créée par les deux couples Redox en présence, elle dépend également de nombreux facteurs expérimentaux :

- La température,
- L'agitation de l'électrolyte,
- La conduction électrique du milieu,
- L'aération (concentration en dioxygène),
- Du rapport surface anode/ surface cathode,
- Présence de bactéries anaérobies, réductrices de certains sels.

Par exemple, les couples Fe/Fe^{2+} et $\text{O}_2/\text{H}_2\text{O}$ ne réagiront pas à la même vitesse en milieu sec qu'en milieu humide. Dans certains cas, il peut même se produire une inversion des potentiels Redox. Au contact de certaines solutions organiques, l'étain (Sn), par exemple, peut devenir moins « noble » que le fer. Si bien que très souvent il sera difficile de prévoir les tendances, sans avoir recours à l'expérimentation.

4. Formation « indésirable » d'une pile type Volta

Lors de la conception d'un appareil, on sera souvent amené à associer des couples Redox différents. Pour certaines parties l'emploi de l'acier sera nécessaire pour ses qualités mécaniques (essieux, châssis, coque de bateaux), alors que pour d'autres éléments du même dispositif on privilégiera l'aluminium pour sa légèreté (habitable). Si l'ensemble est amené à recevoir des projections humides, alors toutes les conditions seront réunies pour qu'un courant galvanique s'établisse et que la corrosion d'un métal s'amorce. On pourra également observer une corrosion galvanique si un seul métal est en contact avec un seul électrolyte mais qui présente des zones de concentration différentes.

Je présente ci-après quelques exemples de formation de pile Volta et les solutions apportées.

Cette liste est non exhaustive. Les quelques exemples retenus, montreront que ce phénomène ne peut être négligé et doit rester présent à l'esprit dans toute

conception industrielle, artisanale et même dans le domaine médical.

4.1. Courants galvaniques buccaux

Toutes les personnes qui ont eu, il y a quelques décennies, des « plombages » sur une dent cariée se souviendront de la sensation fortement désagréable ressentie lorsqu'on suçait un bonbon sur lequel était resté collé un petit morceau de papier aluminium. On pouvait éprouver le même désagrément avec certains couverts.

Jusqu'aux environs des années 1960, ces « plombages », qui ne contenaient pas de plomb, étaient constitués par un amalgame de poudres d'alliages métalliques à base d'argent (650/0) d'étain (290/0) et de cuivre (60/0), que le praticien malaxait avec un métal, liquide à la température ordinaire, le MERCURE.

Dans le cas de la situation envisagée ci-dessus on retrouve un couple Redox Hg^{2+}/Hg ($E^\circ = +0,85 \text{ V}$) et un couple Al^{3+}/Al ($E^\circ = -1,66 \text{ V}$) reliés par un excellent électrolyte, la salive. Autrement dit, tous les ingrédients nécessaires à la formation d'une pile Volta sont réunis. La sensation désagréable ressentie est provoquée par le courant galvanique résultant. Outre le désagrément, ce type de « plombage » libère des ions de métaux lourds, qui vont migrer dans l'organisme du patient.

Depuis l'an 2000, les praticiens disposent de capsules contenant un eutectique prédosé, pour remplacer un ancien plombage.

On conçoit bien que lors de la pose d'une couronne, d'un implant, ou mise en place d'une prothèse dentaire, une attention très minutieuse doit être apportée au choix des matériaux utilisés. Celui-ci est réglementé par une série d'arrêtés, dont le dernier en date est du 15 mars 2010. Malgré cela, sur le certificat d'identification d'une prothèse est signalé une possible incompatibilité avec des métaux ou alliages déjà présents dans la bouche.

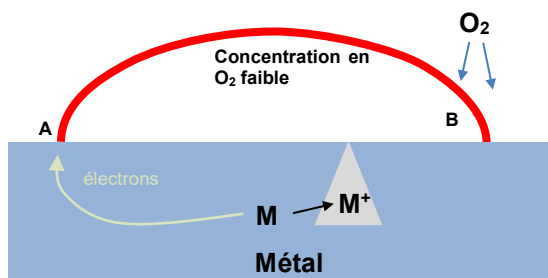
La formation de courants galvaniques de ce type, aurait des conséquences plus graves dans le cas de la pose de « vis » pour consolider une fracture ou dans celui de la pose d'une prothèse (genou, hanche). Le choix des matériaux devient encore plus crucial.

4.2. Corrosion par piqûre d'un porte savon en inox.

Pour protéger un métal de l'oxydation, et améliorer son esthétique, on peut le recouvrir d'une pellicule de chrome. Mais au bout de quelques années on peut observer à sa surface quelques points d'oxydation, certes inesthétiques, mais apparemment anodins. Nous allons voir que cette attaque n'est pas aussi inoffensive qu'elle n'y paraît.

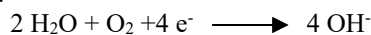
Cet objet placé dans un environnement humide a subi une corrosion par piqûres ou corrosion type pitting. Celle-ci se développe en deux temps.

Première étape : Une goutte d'eau stagne sur le métal, ici le chrome.

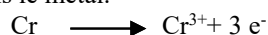


Au niveau des zones A et B le métal est en contact avec un liquide plus riche en dioxygène qu'au milieu de la goutte d'eau. Il en résulte que l'électrolyte de périphérie et l'électrolyte central ont des potentiels Redox différents. Il va s'établir un courant galvanique entre zone extérieure et zone intérieure à travers le métal.

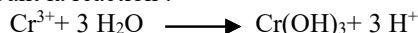
Dans les zones A et B on observe une réaction cathodique :



Dans la partie centrale de la goutte, le chrome cède des électrons en passant à l'état d'ion soluble et laisse donc un trou dans le métal.

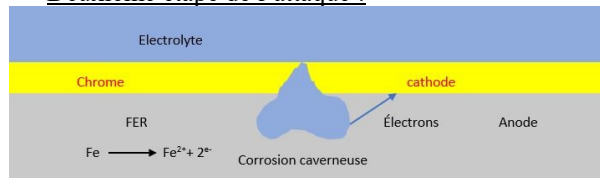


Ces ions chrome vont réagir avec les molécules d'eau suivant la réaction :



Dans le **fond** de la piqure, amorcée par le départ d'atomes de chrome, la formation d'ions H^+ va acidifier le milieu et accélérer la transformation des atomes de chrome en ions solubles. En surface on n'observera qu'un petit point d'attaque, alors qu'en dessous la cavité va s'agrandissant (corrosion caverneuse).

Deuxième étape de l'attaque :



Localement, au bout d'un certain temps, le départ des atomes de chrome sera suffisant pour que l'électrolyte vienne au contact du fer. On retrouve, alors les trois composants d'une pile Volta classique : deux métaux d'électropositivités différentes reliés par un électrolyte. Il en résulte un courant galvanique qui entraîne la corrosion du fer. Le chrome qui devait initialement protéger le fer va maintenant en accélérer sa destruction.

On retrouvera le même phénomène sur tous les objets recouverts d'une couche métallique protectrice. Ce peut être du chrome mais aussi du nickel, de l'étain ou du zinc. Pour retarder cette attaque il faut choisir un métal peu oxydable et en augmenter l'épaisseur. Il en résulte un coût plus onéreux.

4.3. Les boîtes de conserves.

Une boîte de conserve est fabriquée à partir de fer blanc, c'est-à-dire d'acier doux contenant une proportion de carbone inférieure à 0,08 0/0 recouvert

d'une couche d'étain et quelques fois de vernis. Les feuilles sont découpées en flans, qui seront soudés électriquement, pour former le corps de la boîte. Par endroit le revêtement d'étain peut présenter des discontinuités et au niveau de la soudure il a totalement disparu sous l'action de la chaleur. Là, le fer s'y trouve à nu.

Les liquides alimentaires contenus dans la boîte, sont plus ou moins acides ou salés. Aux endroits où ils se trouvent en contact avec les deux métaux les courants galvaniques vont corroder le fer, pouvant aller jusqu'à la perforation de la boîte. Pour éviter ce risque, pour certaines conserves on sera amené à recouvrir tout l'intérieur de la boîte de vernis (4 micromètres pour les haricots verts et pour le concentré de tomates 8 à 12 seront nécessaires). Dans d'autres conserves les soudures seules seront rechampies (dépôt d'une bande de vernis)



En présence de certains acides organiques (acétique, citrique, oxalique...) les couples Redox du fer et de l'étain s'inversent. Le revêtement d'étain devient sacrificielle, et le fer s'en trouve protégé. Les ions étain passés en solution, apparemment inoffensifs pour l'être humain, vont agir sur le goût et la couleur des aliments. Pour certains, comme les asperges, on constate une amélioration, pour d'autres les résultats seront décevants et un dépôt de vernis sera indispensable.

4.4. Les radiateurs de chauffage central.

Pour réaliser une installation de chauffage central, actuellement, sur le marché on dispose de radiateurs :

- En acier,
- En aluminium extrudé,
- En fonte d'aluminium.

Si on était amené à changer un radiateur ou à en ajouter un nouveau, il serait peu judicieux de changer de matériau. Des radiateurs en acier couplés avec un en aluminium constituerait une excellente pile Volta, avec les dégâts que nous avons déjà vus.

Sur une installation, homogène au point de vue radiateurs, on réalise le circuit d'eau avec des tuyaux de cuivre. Au niveau des raccords on retrouvera deux métaux de potentiels Redox très différents reliés par un liquide. Il s'en suit la formation d'un courant galvanique qui va corroder le fer ou l'aluminium suivant le cas (corrosion caverneuse). Si on utilise une tuyauterie en PER, le problème ne sera pas résolu pour autant, car les

raccords utilisés sont en laiton. La solution pour éviter ces ennuis est d'interposer un manchon galvanique.



A défaut de tels manchons, il faut éviter la liaison électrique entre les deux métaux, en interposant un joint isolant en polyéthylène ou néoprène, mais pas de fibre ni d'étoupe. On rencontre le même problème lors de l'installation d'un chauffe-eau.

4.5. Les coques de bateaux.

Bien qu'au départ, la coque d'un bateau soit recouverte d'une couche de peinture, cette protection va subir, au cours du temps, de nombreuses éraflures mettant l'acier au contact de l'eau de mer. Ce métal sera soumis à deux sortes de corrosion. L'une sur la partie immergée, l'autre au niveau de la ligne de flottaison.

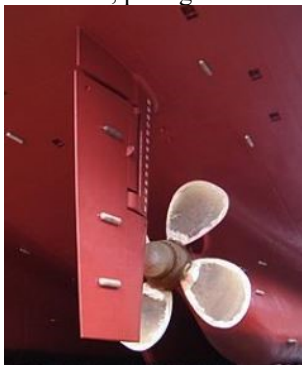
Pour la partie immergée :

La coque du bateau est en acier et les hélices sont souvent en bronze (alliage à base de cuivre). Il se forme une pile type Volta, dont le pôle positif est le métal le plus électropositif (Cu) et le pôle négatif sera le fer. Donc la coque (Fe) se corrodé en libérant des électrons et des ions fer solubles. Dans l'eau de mer, une tôle d'acier non protégée perd en moyenne 0,125 mm par an.

Au niveau de la ligne de flottaison :

Dans cette zone, on observe un gradient de concentration en gaz dioxygène. A ce niveau va s'amorcer une corrosion pitting, déjà citée dans le cas du porte savon. On retrouvera ce genre de problème avec toute structure métallique partiellement immergée.

Pour éviter ces corrosions, on a recours à une protection par anodes sacrificielles, en fixant sur la coque des blocs de Zinc (Magnésium ou Aluminium). Ce sont des métaux dont le potentiel Redox est inférieur à celui du fer ou celui du cuivre. Ce sont eux qui passeront à l'état d'ions, protégeant ainsi Cu et Fe.

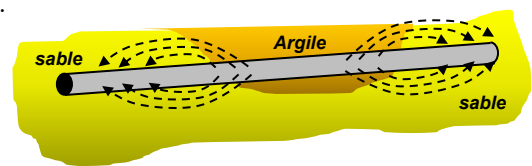


Anodes solubles posées sur une coque

L'autre solution, mais plus délicate à mettre en œuvre, est d'utiliser un générateur extérieur, mis en opposition par rapport à la pile Volta susceptible de se créer.

4.6. Les canalisations enterrées.

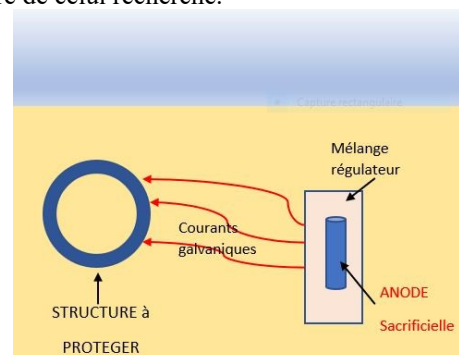
Par suite de sa longueur, une canalisation devra traverser des terrains de natures différentes donc des zones de potentiels Redox différents. La même situation peut se retrouver pour une citerne reposant sur le fond de fouille (terre vierge compacte humide) et entourée par de la terre de remblai (meuble et aérée). Même si cette conduite ou cette citerne ont été préalablement enduites de peinture ou de goudron, cette protection est inévitablement plus ou moins éraflée au moment de la pose.



Il va s'établir des courants galvaniques entre les zones humides et les zones plus sèches, qui vont produire des plages de corrosion. Cela représente un problème crucial, lorsqu'il s'agit de structures utilisées pour stocker ou acheminer des liquides combustibles ou des produits chimiques.

La solution adoptée pour éviter ce risque, a été de créer une pile type Volta.

Dans l'environnement de la structure à protéger a été enfoui un métal (Al, Zn ou Mg). Celui-ci deviendra anode et sera peu à peu corrodé d'où le nom d'anode sacrificielle. Certaines contraintes doivent être respectées. Du dihydrogène se forme au niveau des zones cathodiques. Celui-ci a tendance à pénétrer dans la phase métallique (notamment l'acier). Une protection disproportionnée conduirait à une production excessive de H₂ et à une fragilisation du métal, donc l'effet contraire de celui recherché.



5. Conclusion.

Les quelques exemples choisis, avaient pour objectif de montrer qu'un courant galvanique peut induire des dégâts dans des domaines aussi variés qu'inattendus. Les explications données sont certainement un peu succinctes. Mais chaque exemple est un cas particulier, dans lequel certains facteurs expérimentaux vont avoir

une action sur les effets d'un courant galvanique. On peut citer :

- La structure cristalline du métal,
- La cinétique chimique,
- La résistivité du milieu,
-

L'altération des produits manufacturés par les courants galvaniques, constitue un impact économique important. Si bien que pour chaque projet aussi bien dans le domaine artisanal, qu'industriel ou encore médical des normes bien précises ont été établies. Tout cahier des charges est tenu de s'y conformer.

Publicité






LycéeEole 2019



Participez au concours d'éoliennes LycéeEole
dédié aux lycées d'Ile-de-France
Ouvert aux équipes projet des classes de 1^{ere} et terminale S & STIDD

Mercredi 17 Avril 2019

Pré-inscription: <https://goo.gl/forms/11bveKiwYCRFSqyv1>



Scan me





Vous pouvez avoir une idée de ce que l'on fait pendant le concours dédié au DUT GIM (Genie Industriel & Maintenance) :

https://www.youtube.com/watch?v=z_9FBLycPwE&t=182s

L'hydrogène, vecteur énergétique du futur – Situation actuelle et perspectives, opportunités et aspects économiques

Soirée débat organisée et parrainée par :

SEE (Société de l'Electricité, de l'Electronique et des Technologies de l'Information et de la Communication)
Club technique « Systèmes Electriques » et « Stockage et nouveaux Moyens de Production »
CIGRE – Comité National Français
IEEE Power & Energy Society

Résumé : Le 14 juin 2018 s'est tenu une soirée débat sur "L'hydrogène, vecteur énergétique du futur – Situation actuelle et perspectives, opportunités et aspects économiques" dans la tour RTE à la Défense. Cette soirée est une introduction à deux autres soirées de 2019. L'une portera sur l'utilisation de l'hydrogène dans des applications stationnaires et l'autre sur les applications de mobilités.

Je propose de présenter rapidement cette soirée.

(Synthèse : JP Ilary)

1. Programme

17h50 : Introduction par :

Claire LAJOIE-MAZENC (*Présidente du Club Technique Stockage et nouveaux moyens de production*),

- L'hydrogène énergie hier, aujourd'hui et demain – Didier DALMAZZONE (*ENSTA ParisTech*)
- La place de l'hydrogène dans les scénarios de l'Agence Internationale de l'Energie – Cédric PHILIBERT (*AIE*)
- Les marchés de l'hydrogène et la révolution énergétique – Jean-Paul REICH (*AFHYAPAC*)
- Hydrogène et transition énergétique – le point de vue d'un leader des gaz industriels – Xavier VIGOR (*Air Liquide*)

19h00 : Pot de l'amitié

Rapport de la CRE – étude de prospective de l'hydrogène à long terme.

2. L'hydrogène énergie hier, aujourd'hui et demain

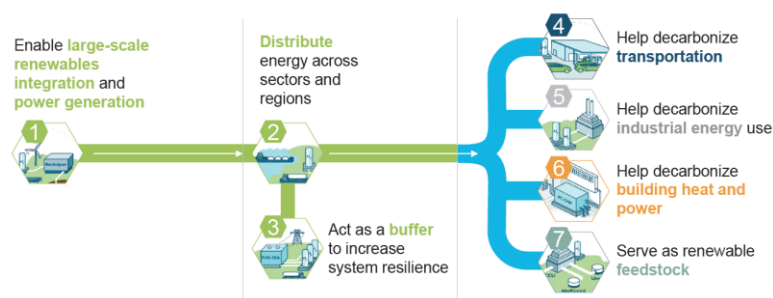
Institut carnot MINES. ENSTA ParisTech

Découvert en 1766 par Henry CAVENDISH et LAVOISIER a proposé le mot « hydrogène ». En 1839, William GROVE développe le premier carburant à gaz. Entre 1900-1909, première voiture utilisant du gaz de synthèse (SYNGAS) comme fuel.

1923, Geneticist John Haldane produisait que d'ici 400 ans, on utilisera le vent pour produire du gaz.

1962, les programmes Gemini & Apollo vont utiliser les cellules à gaz pour produire de l'électricité et de l'eau.

L'hydrogène peut avoir 7 rôles dans la transition énergétique (source : Hydrogen Council)



La production mondiale de l'hydrogène est principalement issue :

- Gaz naturel 49%
- Liquid HC 29%
- Charbon..... 18%
- Electrolyse eau 4%.

Le futur de l'hydrogène :

Si le pétrole augmente, l'hydrogène pourra devenir compétitif.

- Cout : Electrolysis : 6-15\$/kg
- Carriage cost : 1,25 \$/kg
- Reformage du méthane : 1,5 \$/kg

L'hydrogène naturel peut exister sur terre (Turquie, Russie (40000 m³/j), Caroline-du-Nord et Mali) et est produit de façon continue.

- Conversion de l'hydrogène en électricité : Rocket engine LH2 – LO2
- Internal combustion engine (BMW Hydrogen 7)
- Booster le moteur thermique par l'injection d'hydrogène.
- Piles à combustibles (lect+thermique)

Reste encombrant par rapport à l'essence.

Principe des piles à combustibles (catalyseur, sauf si travail à haute température). Efficacité des piles à combustible (E/V en fonction de j/A.cm²)

Les différentes techno piles à combustible MCFC, SOFC, PEMFC, PAFC et AFC

Autres piles de recherche : DBFC, FAFC, PCFC

Domaine de puissance : 1MW à 1W.

Stockage de l'hydrogène dans un véhicule :

5kg de H₂ pour 500 à 600km soit 140L de gaz à 700 bar.

3. La place de l'hydrogène dans les scénarios de l'Agence Internationale de l'Énergie

On est arrivé à l'hydrogène par l'industrie (source ETP 2017 émission CO₂ dans le scénario 2 degrés) en cherchant quel moyen permettait de diminuer la production de CO₂. L'industrie du ciment, la sidérurgie et la chimie seront les principales sources d'émissions résiduelles en 2050.

Avec un facteur de charge élevé, le prix de l'électricité domine celui des électrolyseurs. Avec des « surplus » d'électricité limités, la situation serait inverse.

L'ammoniac est une autre source d'hydrogène maniable et versatile. Il peut être utilisé dans divers domaines. Un combustible de choix pour les navires. L'efficacité P to P (product to pay) meilleure que celles des autres combustibles.

Voir Japan's energy carriers program 2017 (organic hydrides) pour ce qui est du développement Japonnais.

L'électricité renouvelable pour faire de l'acier sans émission en remplaçant les gaz naturels par l'hydrogène.

Le NH₃ comme matière première ou pour stocker l'énergie : il sera moins cher de l'importer. H₂ pur industriel ou énergie serait moins cher extrait du gaz naturel et capture de CO₂. Pour de plus amples informations consulter le site www.iea.org/publication/insights et plus particulièrement les données sur <https://webstore.iea.org/statistics-data>

4. Les marchés de l'hydrogène et la révolution énergétique

2013, Engie reprend la recherche sur l'hydrogène pour un objectif 2050.

L'hydrogène est souvent présenté comme solution à un problème. La production d'hydrogène peut se faire dès qu'il y a du vent ou du soleil avec démarrage et arrêt en quelques secondes avec possibilité de le stocker. En dirigeant la production vers les « marchés » (*marchés les plus rémunérateurs*), il devient très intéressant.

Une production centralisée avec distribution par camions (300 kg d'H₂ seulement) est à comparer à une production décentraliser grâce à une gestion de la production. Cette dernière solution permet de limiter la phase distribution. On peut envisager un prix de vente aux environs de 6€/kg d'H₂.

Le couple Batterie (puissance pas chère et de la récupération) et pile à combustible sont la nouvelle frontière de l'électromobilité. Les futurs véhicules seront hybride.

5. Hydrogène et transition énergétique – le point de vue d'un leader des gaz industriels

Les usages et les projets concret ont démarré et c'est réel.

Rôle de l'hydrogène (source hydrogen concil – Enable the renewable energy system – hydrogen scailing up) :

- Intégration avec les énergies renouvelable,
- Stockage,
- Usage : mobilité, résidentiel, chimie et industrie

Dans l'objectif d'une élévation de 2°C dans le monde, l'hydrogène peut participer à hauteur de 18%.

Dans la décennie, une grande partie de ces solutions seront valide.

L'électrolyse, avec de l'électricité verte (à 40€ de MW/h, l'H₂ est à 4€/kg, soit 75% du cout est à imputer à l'électricité pour la production et le reste au transport)

6. Réponse aux questions

Pour une période d'utilisation de quelques heures (<10h) un stockage par batteries seules convient. Au-delà, le pompage est préférable mais cela reste à quelques jours. Et au-delà, on passe sur de la production d'hydrogène.

Les nouveaux marchés qui vont décoller tournent autour de la qualité de l'air, donc l'électromobilité et l'industrie.

En Allemagne, il a été installé des pompes à hydrogène, mais les voitures ne sont jamais réellement venues.

En France, une démarche différente, c'est celle de flotte de véhicule. Avec un groupe de 30 véhicules dans la flotte, la station de recharge peut être implantée.

Pour une pile à hydrogène, le platine dispose de grandes réserves mondiales et la quantité a été grandement diminué dans la pile. Une voiture diesel incorpore plus de platine (FAP) qu'une voiture à pile.

La pile émet de la chaleur et au japon 350000 piles installées dans l'habitat et produisent de l'électricité et de l'eau chaude. Cependant, l'énergie n'étant pas verte, au final, il y a production de CO₂.

Les JO de TOKYO de 202 sera la vitrine de l'hydrogène.

Cogénération : Une pile produit de l'électricité, de l'eau, de la chaleur et de l'Azote. C'est pourquoi des projet à hydrogène liquide dans les avions vont surement apparaître en remplacement de l'APU

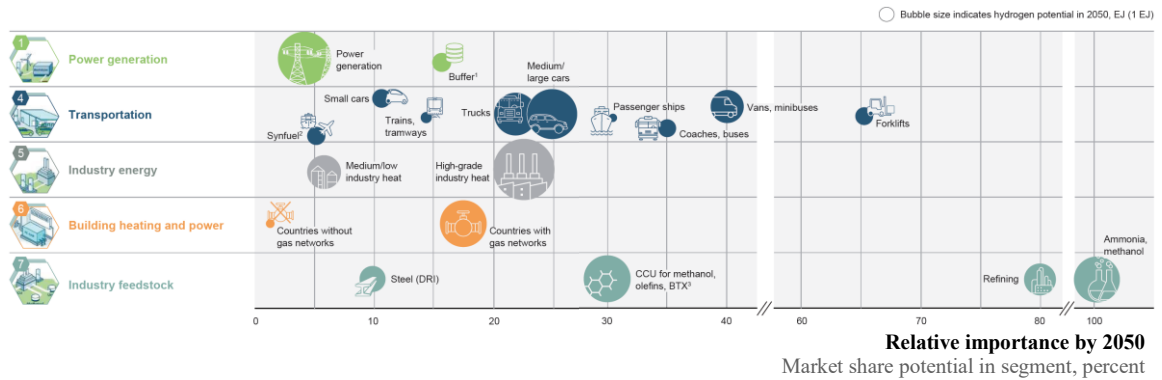


Illustration : Hydrogen can play a critical role in the low-carbon technology portfolio (source : Hydrogen Council)

1 Percent of total annual growth in hydrogen and variable renewable power demand

2 For aviation and freight ships

3 Percent of total methanol, olefin, BTX production using olefins and captured carbon

Ces soirées débats sur l'énergie se poursuivront durant l'année 2019. Pour plus d'information, il faut se rendre sur le site de la SEE.

Publicité

Publicité

Pour une vision complète de l'État de l'Art, l'évolution des techniques, leur développement et leurs applications

Commandez les numéros de la **REE** REVUE DE L'ELECTRICITE ET DE L'ELECTRONIQUE

<p>N°4/2016</p> <p>D1. La fusion thermonucléaire et le projet ITER</p>	<p>N°5/2016</p> <p>D1. Enjeux d'un développement massif des EN dans le système électrique européen du futur D2. URSI France 2016</p>	<p>N°1/2017</p> <p>D1. Le Grand Carénage D2. Le développement des liaisons à courant continu (HVDC)</p>	<p>N°2/2017</p> <p>D1. Les microgrids D2. L'énergie et les données</p>	<p>N°3/2017</p> <p>D1. La foudre D2. Les microgrids (Partie 2)</p>
<p>N°4/2017</p> <p>D1. Mobilité électrique D2. ICOLIM 2017</p>	<p>N°5/2017</p> <p>D1. Retour sur le sonar et nouveaux développements en radar et sonar D2. URSI France 2017</p>	<p>N°1/2018</p> <p>D1. L'autoconsommation D2. Jicable HVDC'17</p>	<p>N°2/2018</p> <p>D1. La blockchain et l'énergie</p>	<p>N°3/2018</p> <p>D1. La 5G</p>

La REE est une publication de la SEE. Vous pouvez commander les derniers numéros ainsi que les archives antérieures à 2011 en remplissant le formulaire ci-dessous. Liste complète des archives disponible sur le site www.see.asso.fr

BON DE COMMANDE AU NUMERO

A retourner à la SEE/REE - Service Abonnements, 17 rue de l'Amiral Hamelin - 75783 Paris cedex 16 - France - Tél. : 33 (0)1 5690 3717 - abo@see.asso.fr

Tarifs		
Prix unitaire TTC (TVA 2,10 %)		
Années	France & UE	Hors UE
2012 à 2018	28 €	30 €
2011 (N° 5,6)	28 €	30 €
N° antérieurs	18 €	20 €

Date, signature et cachet de l'entreprise s'il y a lieu :

Nom et prénom :
 Société : N° TVA* :
 Fonction :
 Adresse :
 Code postal [] [] [] [] Ville : Pays :
 Tél. : [] [] [] [] [] [] e-mail :

* Obligatoire pour les pays de l'UE

Je commande :

N° : [] [] Année : [] [] [] [] N° : [] [] Année : [] [] [] []
 N° : [] [] Année : [] [] [] [] N° : [] [] Année : [] [] [] []
 N° : [] [] Année : [] [] [] [] N° : [] [] Année : [] [] [] []
 N° : [] [] Année : [] [] [] [] N° : [] [] Année : [] [] [] []

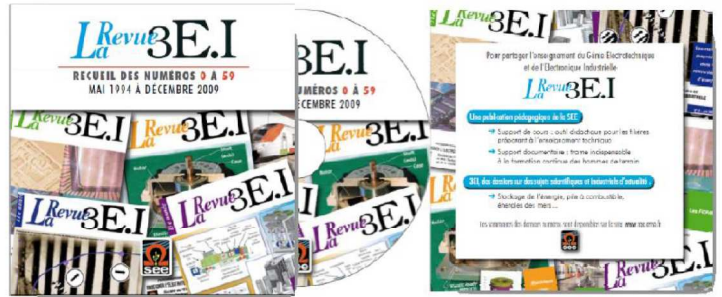
Je règle la somme totale de : € TTC (TVA 2,10 %) par chèque bancaire à l'ordre de la SEE Carte bancaire (Visa, Eurocard/Mastercard, American Express)
 N° Carte : []
 Date de validité : [] [] [] [] N° cryptogramme : [] [] [] [] (3 derniers chiffres au dos de la carte)

Conformément à la Loi Informatique et Libertés du 06/01/1978, vous disposez d'un droit d'accès et de rectification aux informations qui vous concernent. Contacter le Service Abonnements de la SEE

15 ans d'archives 3EI en DVD

La SEE vous propose d'acquérir le DVD « archives » 3EI regroupant tous les articles des numéros 0 à 59, de mai 1994 à décembre 2009, sous forme numérique (PDF scannés/ vectoriels).

Pour toute commande merci de remplir le bulletin joint ci-dessous et de l'envoyer à l'adresse indiquée :



BON DE COMMANDE

Raison Sociale :
Adresse :
Ville :
Tel. :
E-mail :

Nom du contact : M/Mme
Pays :
Fax :

	France et pays de l'Union Européenne	Hors Union Européenne
Tarif individuel	60 €	70 €
Tarif collectivité (CDI, laboratoires...)	100 €	110 €

MONTANT TOTAL DE LA COMMANDE :€ HT soit€ TTC (TVA 20%).

REGLEMENT:

- Par chèque bancaire à l'ordre de la « SEE »
- Par virement bancaire :
BNP Paribas, Paris Associations (02837)

RIB: 30004 00274 00010336242 58
IBAN: FR76 3000 4002 7400 0103 3624 258
BIC: BNPAFRPPAA

Date, Lieu

Cachet, Signature
(Précédés de la mention "lu et approuvé")

Contact : Mlle Mélisande de LASSENCE
Tél : 01.56.90.37.17 - abo@see.asso.fr

