

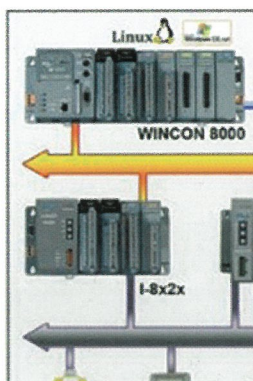
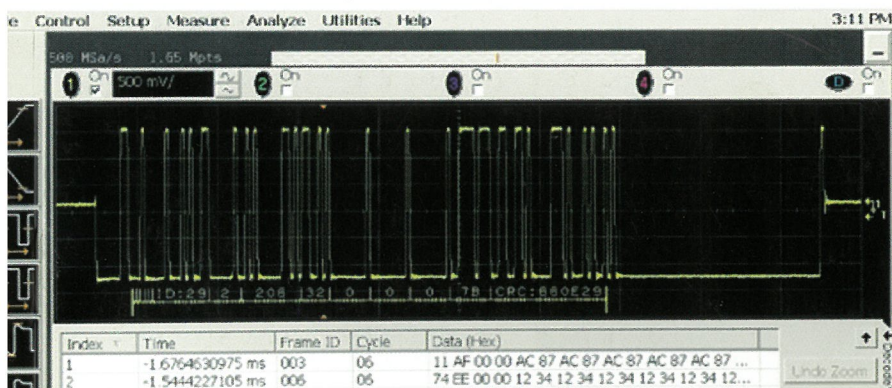
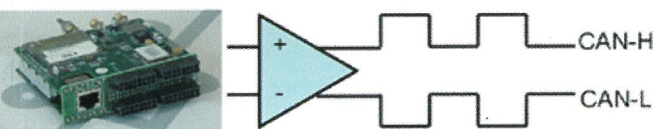
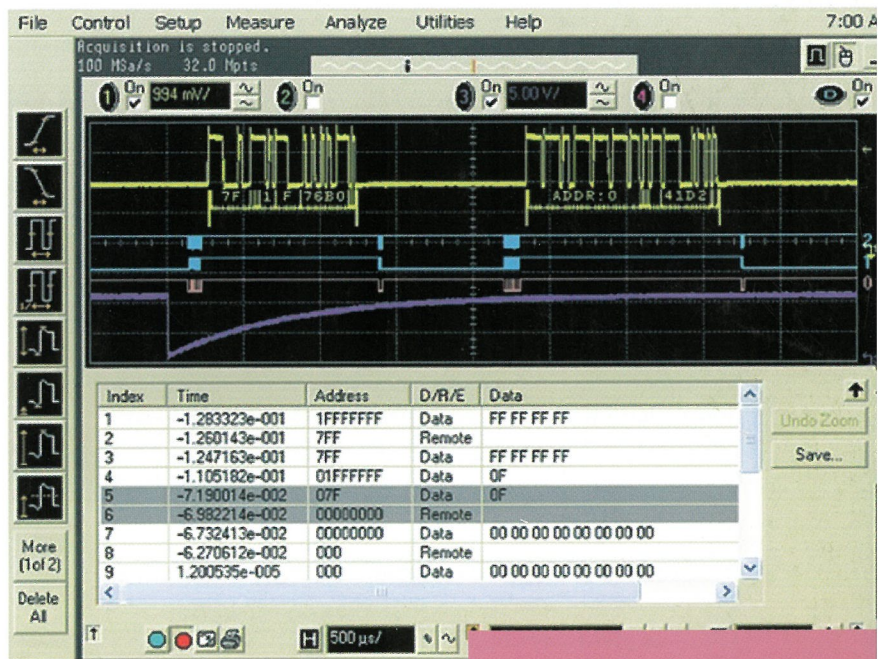
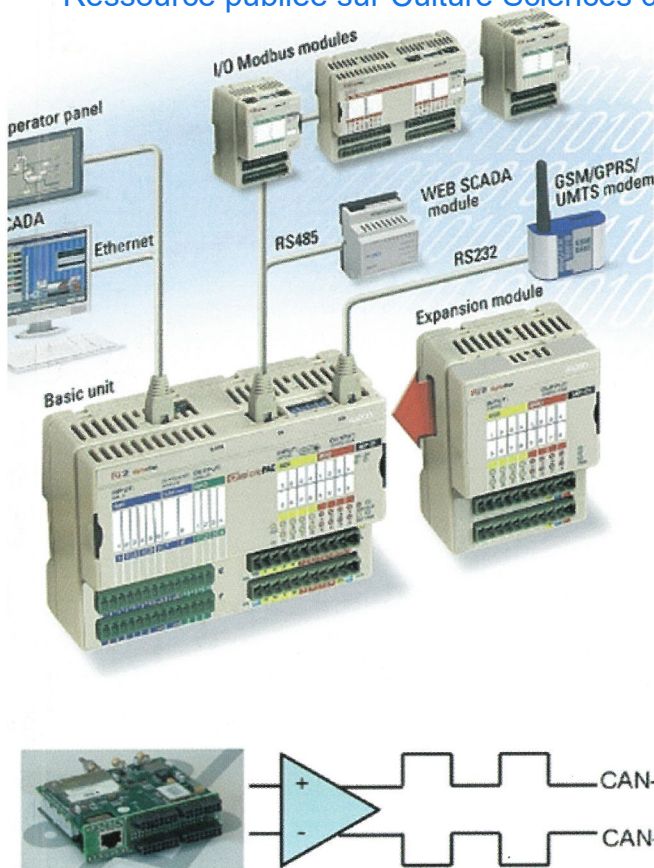
16^e année

La Revue



SEE.I

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



Standards de communication

Publication trimestrielle du Cercle Thématique 13.01 de la SEE

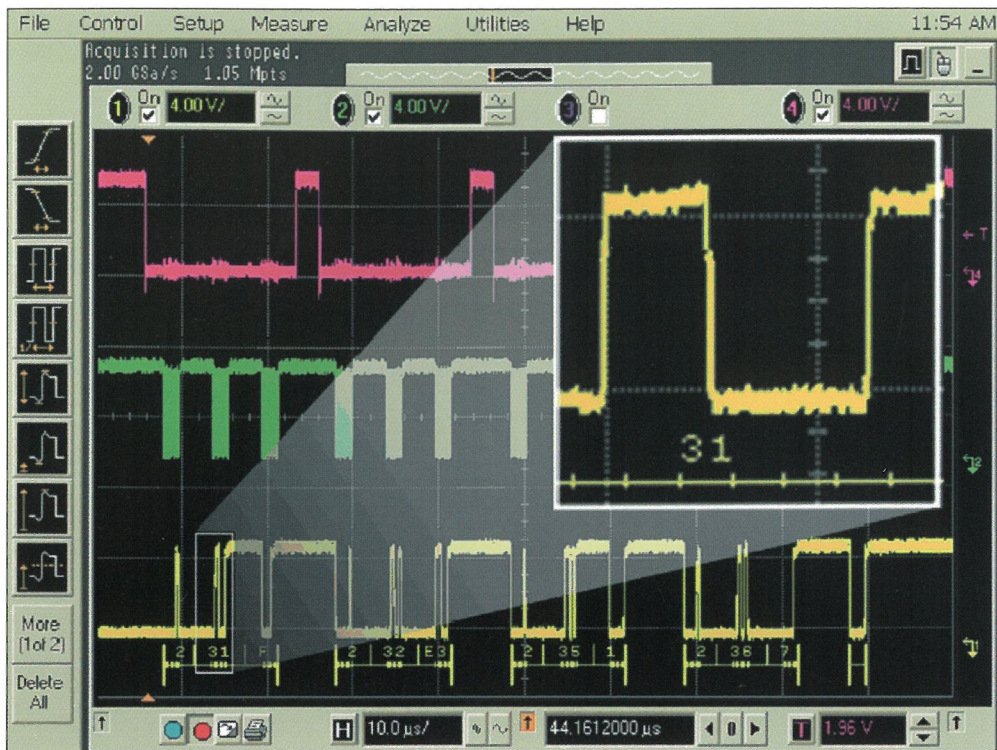
ENSEIGNER L'ELECTROTECHNIQUE ET L'ÉLECTRONIQUE INDUSTRIELLE



Société de l'Electricité, de l'Electronique et des Technologies de l'Information et de la Communication

N° 60 - Mars 2010

Crédit photos : ASCON, AGILENT



Serial Decode [X]

Show Decode [Close]

Protocol: FlexRay [v]

Data Source: Channel 1 [v]

Baud Rate: 10.0000 Mb/s [v]

Cycle Time: 3.00000 ms [v]

[Auto Setup] [Manual Setup...]

[Help] [?]

Serial Search [X]

Enable Searching [Close]

Trigger On Search Stop On Trigger [Help] [?]

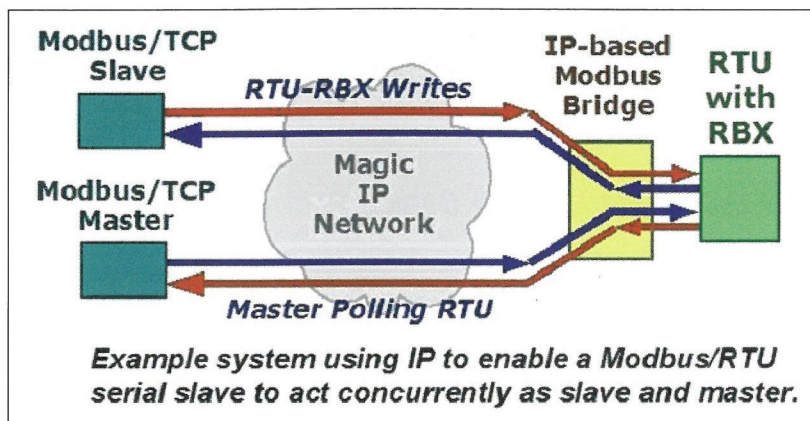
Frame ID: 17F [Hex] [v]

All Cycles

Repetition Factor: 4 [v]

Base Cycle (Decimal): 0 [v]

Use Navigation tab when stopped to see found search criteria.





La Revue 3EI

publication trimestrielle
du **Cercle Thématique 13-01**
de la **SEE**

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

17, rue de l'Amiral Hamelin, PARIS 75783 CEDEX 16
Tél : 01 56 90 37 00 Fax : 01 56 90 37 19
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'Électrotechnique et l'Électronique Industrielle

La Revue 3EI, Édition SEE,
17 rue de l'Amiral Hamelin
75783 PARIS Cedex 16

Directeur de la publication
Paul FRIEDEL
Président de la SEE

Rédactrice en Chef
Marie Michèle LE BIHAN

Adresser les propositions d'article à :
revue3ei.art@voila.fr

Communication
Micheline BERTAUX
communication@see.asso.fr
01 56 90 37 17

publicité au rapport

Abonnement (4 numéros par an)
déc. 2009, mars, juin, sept. 2010.

tarifs TTC :

Individuel :

France et CEE.....36 €

Pays hors CEE.....46 €

Collectivités

France et CEE.....52 €

Pays hors CEE.....65 €

Réalisation et impression

Repro-Systèmes

23, rue de Verdun 77181 Le Pin

Routage et Expédition

Départ Presse

ZI les Richardets

93966 Noisy le Grand

Dépôt Légal : Mars 2010

Commission Paritaire 1212 G 78028
ISSN 1252-770X

Sommaire du n° 60

Thème : Standards de communication

- p. 2 Éditorial,
- p. 4 Publications, Informations
- p. 5 Les technologies CPL
Xavier CARCELLE, Diego SANTAREN
- p. 10 Bus de terrain et de supervision
J. DEPRez, J. MAILLEFERT, A. JUTON
J.L. BIANCHI, IUT CACHAN
LYCEE VERSAILLES
- p. 31 Supervision des systèmes automatisés en Visual Basic et Modbus/TCP : applications
P. POULET, J-M BARRANCA, LYCÉE DU REMPART, MARSEILLE
- p. 38 Réseaux embarqués pour l'automobile, application aux systèmes de commande
électrique
P. LESERF ESTACA LAVAL

Hors Thème

- p. 42 Etude des bobines couplées et transmission d'énergie à distance sous condition de résonance
L. LASNE, F. MUSSAUTE, K. KRIEGER, A. FARAH UNIVERSITE BORDEAUX I
- p. 51 Initiation à la conversion d'énergie électrique : exemple sur un micro-système de production photovoltaïque
F. GIRAUD, J-F. SERGENT, M. AMBERG, Y. LE MÉNACH UNIVERSITE LILLE 1
- p. 56 Mise en œuvre de régulateurs industriels
C. SERMONDADE LYCÉE LA MARTINIÈRE –DIDEROT LYON
- p. 60 Découvertes d'activités de R&D dans les domaines des machines électriques et de la modélisation électromagnétique
A. BRUGIER LYCÉE ISAAC NEWTON CLICHY
- p. 72 De la spécification à la programmation
D. GUYONVARCH LYCÉE LOUIS BASCAN RAMBOUILLET

Histoire des sciences

- p. 78 La guerre des courants
V. FICHET LYCÉE JULES FIL CARCASSONNE

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'oeuvre 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).

Le thème de ce numéro sur les standards des bus de communication est abordé sous quatre angles :

- ✓ celui d'une vue générale sur les différents bus de terrain et de supervision par M. JL Bianchi, J. Deprez, J. Maillefert, A. Juton,
- ✓ celui des courants porteurs par M. X. Carcelle et D. Santaren,
- ✓ celui des réseaux embarqués dans le domaine appliqué de l'automobile par M. Leserf,
- ✓ celui de la supervision des systèmes automatisés par M. P Poulet et J-M Barranca.

Les sujets des articles hors thème sont variés et nous remercions leurs auteurs pour cette diversité. La rubrique Histoire des Sciences revit avec « La guerre des courants » grâce à M. V. Fichet.

Le comité de rédaction est une nouvelle fois touché par la disparition de l'un de ses membres. M **Claude Oberlin** est décédé au mois de Janvier. Sa carrière s'était déroulée à EDF et il avait longtemps été Directeur du Club Applications industrielles de l'électricité à la SEE dont il était membre Senior. Son soutien à la revue 3EI était chaleureux et enthousiaste : il nous encourageait à faire passer les connaissances à notre communauté et son appui scientifique nous était très utile. L'Équipe de la Revue 3EI, très attristée par sa disparition, tient à lui rendre hommage et transmettre toutes ses pensées et condoléances à sa famille.

En Juin, nous traiterons des **aspects thermiques dans les convertisseurs** et le numéro académique de Septembre sera assuré par l'académie de **Versailles**.

Nous rencontrons une difficulté en début d'abonnement pour l'envoi du numéro de Décembre, car les réabonnements ne sont pas encore très nombreux et l'envoi ultérieur de numéros hors routage est plus onéreux. Nous vous préviendrons donc de la fin de votre abonnement avec le numéro de Septembre et de la nécessité de vous réabonner par un rappel sur l'étiquette de ce numéro. Soyez vigilant !

Nous remercions les auteurs d'articles spontanés qui sont toujours de grande qualité. Envoyez-nous des articles pédagogiques : fiches de TP, TD, cours... et nous sommes toujours très intéressés par des articles présentant des études de systèmes avec une approche pluridisciplinaire.

Nous serons heureux de recevoir vos articles que vous aurez déposés dans la boîte aux lettres dont l'adresse e-mail est revue3ei.art@voila.fr et d'y découvrir vos idées, vos réactions ou vos suggestions. Nous sollicitons également la participation des amoureux de l'histoire des Sciences. Les articles permettant d'alimenter cette rubrique sont les bienvenus.

Pour que cette revue qui contribue à la transmission des connaissances puisse continuer de paraître, nous avons toujours besoin de votre aide. Nous comptons sur vous pour saisir toutes les occasions pour faire connaître et faire vivre notre revue.

Bonne lecture.

Le Comité de Publication de la Revue3EI

La Revue 3EI

Comité de publication

Hamid BEN AHMED

Jean BONAL

Arnaud BRUGIER

Jean FAUCHER

Gilles FELD

Jean-Philippe ILARY

Chérif LAROUCI

Marie Michèle LE BIHAN

Franck LE GALL

Pascal LOOS

Claude OBERLIN

Oviglio SALA

Jean-François SERGENT

Jean-Claude VANNIER

Pierre VIDAL

**Lire la revue 3EI c'est bien et même très bien,
Lire la revue 3EI en étant abonné c'est encore mieux !!!!**

Correctif du n° 59 Revue 3EI (Décembre 2009)

Dans le numéro 59 de Décembre, dans l'article de Messieurs VERGNOL, SPROOTEN, ROBYNS, RIOUS et DEUSE portant sur la Gestion des congestions dans un réseau intégrant de l'énergie éolienne, une formule n'a pas été imprimée à la page 67 en haut dans la colonne de droite.

Nous réparons cette erreur en publiant ci dessous le paragraphe correspondant avec la formule manquante.

b. Utilisation du PTDF pour la gestion des congestions

Le PTDF est utilisé dans l'objectif d'éviter les congestions tout en minimisant les contraintes d'exploitation appliquées aux producteurs. L'équation (1) montre que le PTDF permet de faire le lien entre la variation de puissance dans une ligne (ΔP_{ligne}) et la puissance re-dispatchée entre deux noeuds ($P_{\text{re-dispatchée}}$).

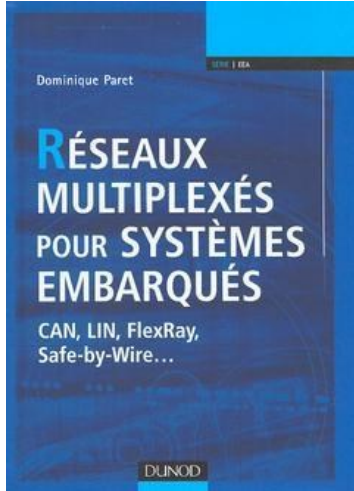
$$\text{PTDF}[\%] = \frac{\Delta P_{\text{ligne}} [\text{MW}]}{P_{\text{re-dispatchée}} [\text{MW}]} \quad (1)$$

L'équation (1) met en évidence que pour réduire la puissance dans une ligne (ΔP_{ligne} négatif), il est préférable que le PTDF soit le plus négatif possible pour limiter la puissance à re-dispatcher entre deux noeuds ($P_{\text{re-dispatchée}}$). Le tableau 2 montre donc que le re-dispatching entre les noeuds 1 et 2 est le plus efficace pour une congestion sur la ligne L₁₂, avec un PTDF de -79,8%. Ainsi, un classement peut être défini suivant l'efficacité des re-dispatchings à réduire le transit dans une ligne. Pour la ligne L₁₂, le classement d'efficacité des re-dispatchings est défini au tableau 3.

Ordre d'efficacité	Re-dispatching		PTDF
	Augmentation de puissance	Diminution de puissance	
1	Nœud 1	Nœud 2	-79,8%
2	Nœud 1	Nœud 3	-50,3%
3	Nœud 4	Nœud 2	-44,8%
4	Nœud 1	Nœud 4	-35,0%
5	Nœud 3	Nœud 2	-29,5%
6	Nœud 4	Nœud 3	-15,3%

Tableau 3. Ordre d'efficacité des re-dispatchings pour la ligne L12.

En vous priant de bien vouloir nous excuser pour cette erreur



Réseaux multiplexés pour systèmes embarqués : CAN, LIN, FlexRay, Safe-by-Wire

Dominique Paret

Collection I Technique et ingénierie, Série EEA

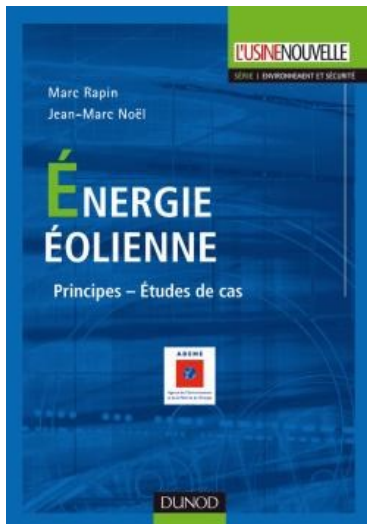
DUNOD

Cet ouvrage décrit les différents types de réseaux multiplexés, aujourd'hui présents dans de multiples domaines industriels (commande de machine-outils, de ligne de production, automobile, avionique, etc.). Il se compose de deux parties.

La première traite du bus CAN, des possibles subdivisions de ses couches physiques, des problèmes de conformité, de ses couches applicatives (CAL, CAN Open, OSEK...), des outils hardware et software nécessaires au développement, à la production, à la maintenance. Ses limites fonctionnelles et applicatives sont également abordées, de même que les principes et les contenus des protocoles TTCAN et FlexRay.

La seconde partie, décrit en détail le bus LIN, un nouveau venu. Elle expose ses fondements, ses particularités, ses problèmes de mise en œuvre et la manière de les résoudre. Les différentes contraintes et possibilités de passerelles entre bus sont aussi présentées, ainsi que la conception des fail safe - System Basis Chip (SBC) et des passerelles gateway, et les applications de type X-by-Wire. Le Safe-by-Wire est traité dans le cadre de son application dans les systèmes de communication des commandes d'airbag.

À titre d'application, l'ouvrage se termine par une description des très nombreux bus et liaisons séries filaires et non filaires, internes (I2C, IEEE 1394...) ou externes (GSM, Bluetooth...), que les industriels emploient aujourd'hui dans un véhicule.



Énergie éolienne, Principes. Études de cas

Marc Rapin, Jean-Marc Noël :

Collection Technique et Ingénierie

DUNOD

L'énergie éolienne est l'énergie tirée du vent au moyen d'un dispositif aérogénérateur. Elle conserve l'énergie mécanique, se transforme en force motrice et permet la production d'énergie électrique. L'objectif de cet ouvrage est de comprendre les développements et les problématiques actuels et futurs de l'éolien, notamment avec les implantations en offshore. Il aborde de manière détaillée :

- l'énergie du vent, le potentiel et la conversion ;*
- les différents sous-systèmes (la pale, le rotor, les équipements de la génération électrique) ;*
- les réalisations éoliennes françaises ;*
- le montage d'un projet pour un parc éolien.*

Véritable outil de référence, cet ouvrage s'adresse aux personnes curieuses de connaître les fondements de cette forme d'exploitation de l'énergie du vent et désireuses d'approfondir plus précisément les principes de fonctionnement des aérogénérateurs.

Sommaire : Avant-propos. Introduction. Les éoliennes modernes : historique et évolution. L'avènement de l'éolien moderne. Le faux départ de l'après-guerre. Le tournant du 1er choc pétrolier. L'actuel et l'avenir : MW et offshore. L'énergie du vent : potentiel et conversion. Caractérisation du vent. Les limites de Betz et de l'éolien. Normes. Les différents composants : la chaîne de conversion de l'énergie et son contrôle. La aple. Le rotor. La génératrice. L'interface-réseau. Les aspects sociétaux et environnementaux.

Les technologies CPL

Xavier CARCELLE

Expert en réseaux-télécommunications, agrégé de Génie Electrique, ancien élève de l'ENS Cachan, carcelle@free.fr

Diego SANTAREN

Agrégé de Physique, ancien élève de l'ENS Cachan, diegosantaren@yahoo.fr

Résumé : Cet article a pour but de présenter les technologies CPL (Courants porteurs en ligne) utilisées pour le transport d'information sur les réseaux électriques. Ces dernières années ont vu l'utilisation massive de ces technologies dans le cadre de réseaux domestiques Ethernet/IP : Elles permettent alors de diffuser à l'intérieur du domicile des abonnés les flux données, voix et images acheminés par les fournisseurs d'accès.

1. Introduction

L'utilisation de supports existants pour le transport d'informations a toujours été une pratique courante dans le domaine des réseaux. Avec la multiplication des réseaux et des besoins de débits, elle est devenue un enjeu crucial. Par exemple, les câbles électriques ont été utilisés depuis la fin du XIX^e siècle par les opérateurs pour les besoins de contrôle-commande longue distance sur leurs réseaux. Désormais, sur ces mêmes réseaux électriques, les technologies CPL ont massivement investi le domaine de l'informatique grand public en apportant une technologie *plug-and-play* haut débit et sécurisée pour l'accès internet.

2. Comment est transportée l'information ?

Les technologies CPL utilisent les câbles des réseaux électriques pour transporter des données binaires. L'information est véhiculée par des courants de faible amplitude et de hautes fréquences qui se superposent aux courants dits forts des réseaux électriques dont la fréquence est plus basse, de l'ordre des 50Hz par exemple pour les réseaux basse tension (figure 1). L'utilisation de fréquences élevées pour transporter le signal CPL permet de coder, moduler et de compresser les données numériques afin d'optimiser les transmissions.

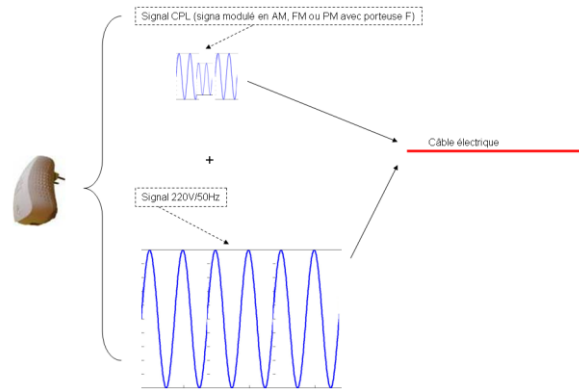


Figure 1 : Utilisation d'une porteuse 220V/50Hz (courant dit fort) sur laquelle est superposé le signal CPL qui est modulé, de faible amplitude et de hautes fréquences.

3. Perturbations électromagnétiques

Les signaux CPL utilisent les gammes de fréquence 3-148 kHz pour les réseaux bas débit et 2-28 Mhz pour les réseaux haut débit (Figure 2).

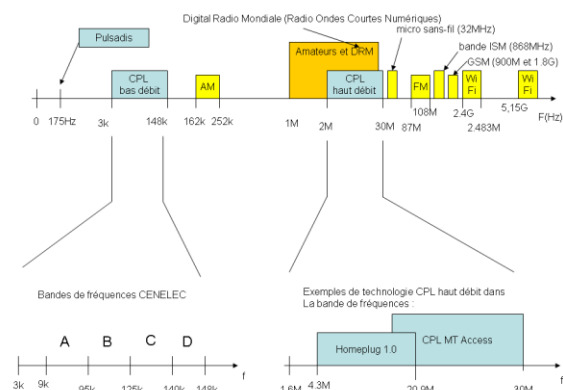


Figure 2 : Spectre de fréquences pour les technologies CPL pour les bas débits et hauts débits

Lors du transport d'information, le câble électrique se comporte comme une antenne qui rayonne dans ces longueurs d'onde. Des phénomènes d'interférence peuvent alors se produire avec les ondes radio externes.

D'autre part, le câble électrique est soumis à des bruits impulsions dus aux arrêts/démarrages des appareils électriques qui y sont branchés. L'utilisation de ces mêmes appareils produit également des bruits blancs ou harmoniques.

Face à ces perturbations, les réseaux CPL vont utiliser des techniques de modulation robuste (exemple : DQPSK en mode ROBO) afin que les signaux transmis sur le réseau électrique soient peu sensibles aux différents bruits extérieurs. Ces techniques, que nous présentons ci-dessous, proposent également une optimisation du transport de l'information.

4. Modulations des signaux CPL

Pour garantir des transmissions robustes tout en fournissant un important débit, la couche physique des réseaux CPL haut débit implémente des schémas de transmission OFDM (Orthogonal Frequency Division Multiplexing). Le principe de cette technique de modulation est de séparer la bande de fréquence en sous bandes étroites, chacune transportant une partie de l'information binaire. Pour obtenir une bonne réponse fréquentielle et ainsi transmettre le maximum d'information sur une portion de fréquence donnée, chacune des sous-bandes est orthogonale : deux bandes de fréquence adjacentes présentent un déphasage de manière à ce que le maximum de puissance de l'une coïncide avec le minimum de puissance de l'autre.

Les signaux des différentes sous-bandes se chevauchent mais grâce à l'orthogonalité n'interfèrent pas. Le transport d'information sur chacune des sous-bandes peut être optimisé en utilisant des modulations numériques comme DQPSK (Differential Quadrature Phase Shift Keying) ou DBPSK (Differential Quadrature Phase Shift Keying).

Les schémas de transmission OFDM permettent l'utilisation efficace de la bande de fréquence tout en garantissant une certaine robustesse face aux perturbations puisque chaque sous-bande est affectée d'un bruit indépendant des autres sous-bandes. Cette technique est également utilisée par le Wi-Fi dans les standard 802.11a et 802.11g ainsi que par l'ADSL. Ces schémas permettent également « d'éteindre » les fréquences du spectre rendues inutilisables par de trop fortes perturbations provenant par exemple des émissions radio (notching).

Pour se prémunir des perturbations, les réseaux CPL bas débit comme HomePlug CC, utilisent quant à eux une modulation à étalement de spectre qui consiste à « étaler » l'information sur une bande de fréquences beaucoup plus large que la bande nécessaire ; ceci dans le but de combattre les signaux interférents et les distorsions liées à la propagation. Le standard HP CC utilise ainsi 3 sous-bandes de la bande 1-175 kHz.

D'autre part, dans chaque sous-bande, une modulation supplémentaire peut-être effectuée par le code DCSK (Differential Code Shift Keying) qui rend les communications résistantes à tout type de perturbations: bruits impulsions, distorsions linéaires et non-linéaires, bruits blancs, ...

Finalement, la couche physique des réseaux CPL basses fréquences utilise des mécanismes de correction d'erreur (Error Correction Code) pour détecter les trames perdues. Elle contrôle également l'intégrité des informations à l'aide d'un champ CRC (Cyclic Redundancy Check) contenu dans les trames.

5. Fonctionnement des réseaux CPL

La structure des réseaux CPL est de type Ethernet mais avec une technique d'accès similaire à celle utilisée dans les réseaux Wi-Fi : CSMA/CA (Carrier Sense Multiple Access/Collision Avoidance).

En effet, le câble électrique est un support à accès multiple et partagé, il faut donc une gestion du réseau pour éviter que les utilisateurs ne transmettent en même temps. CSMA/CA est une technique dite d'accès aléatoire avec écoute de la porteuse. Elle permet d'écouter le support de transmission avant tout envoi de données ce qui réduit le nombre de collisions.

En effet, comme dans le cas du WI-FI, une station ne peut émettre et écouter en même temps le réseau. Aussi contrairement aux réseaux Ethernet « classiques » (norme IEEE 802.3), on ne peut traiter directement les collisions qui se produisent lors de l'émission de données. Le protocole CSMA/CA (norme IEEE P1901) utilise alors un mécanisme d'esquive de collision qui est basé sur des procédés d'écoute de la porteuse associés à des temporisateurs. Pour garantir l'intégrité des données transportées, CSMA/CA définit un principe d'accusé de réception réciproque entre l'émetteur et le récepteur par l'utilisation de trames d'acquiescement ACK (Acknowledgement).

D'autre part, on a vu que le câble électrique est soumis à des perturbations électromagnétiques du fait des machines et appareils qui y sont branchés. Outre les techniques de modulation et de correction d'erreur implémentées au niveau de la couche physique qu'on a décrites plus haut, la méthode d'accès CSMA/CA permet de demander la réémission des données

perdus ; ce qui constitue une garantie supplémentaire d'avoir un bon ratio signal sur bruit ainsi qu'une certaine immunité aux perturbations.

6. Topologies

Suivant les applications et le nombre d'équipements connectés, les réseaux CPL peuvent présenter différentes architectures.

Dans le cadre d'un réseau domestique, la topologie la plus adaptée sera celle dite de « maître-esclave » : un équipement central supervise le réseau et en particulier les communications entre les équipements « esclaves ». En se greffant sur la logique du réseau électrique avec un compteur électrique central dont dépendent les différentes prises électriques, la topologie maître-esclave présente une grande facilité d'installation. Néanmoins, le fonctionnement de ce type de réseau dépend entièrement de l'équipement maître et une défaillance de ce dernier le paralysera entièrement.

Pour remédier à ce problème, les réseaux CPL peuvent adopter une topologie « pair-à-pair » où tous les équipements jouent le même rôle ; la défaillance d'un équipement n'ayant alors que peu d'incidence. Dans ce type d'architecture, chaque équipement peut communiquer de manière indépendante avec un autre équipement ; la cohérence du réseau étant maintenue par un échange permanent de paramètres entre tous les nœuds du réseau. Ce mode de fonctionnement présente une grande facilité d'installation et il a été adopté par le standard HomePlug 1.0 car il permet de créer rapidement des réseaux CPL.

Le principal inconvénient du mode « pair-à-pair » est que pour des réseaux avec un grand nombre d'équipements, l'échange permanent de paramètres de contrôle et de supervision entre les nœuds peut diminuer les performances. Dans ce cas, on peut adopter une topologie centralisée qui effectue une synthèse entre les modes « maître-esclave » et « pair-à-pair » : un équipement central supervise et optimise les communications entre les équipements CPL sans que les communications ne passent forcément par cet équipement coordinateur. Une des fonctions principales de ce dernier est de gérer temporellement l'accès au média des différents équipements qui veulent communiquer entre eux. L'utilisation de la technique TDMA (Time Division Multiple Access) permet alors d'optimiser le débit du réseau. Cette architecture a été adoptée par le standard HomePlugCC pour construire des réseaux à très haut débit (200 Mbit/s) adaptés aux applications multi-média.

7. Sécurité

Comme tout autre réseau, les réseaux CPL peuvent être soumis à différents types d'attaques, soit pour en perturber le fonctionnement, soit pour intercepter les informations transmises. L'avantage des réseaux CPL vient toutefois du support qu'ils utilisent.

En effet, le câble électrique est difficilement accessible et il est difficile de s'y brancher directement pour accéder à la couche PHY. Cependant, le signal CPL peut se propager à une certaine distance hors du réseau local puisque le réseau électrique est connecté à l'extérieur du bâtiment. Néanmoins, dans le cadre par exemple d'un bâtiment industriel, ce problème peut être facilement évité en installant des filtres spécifiques au niveau du transformateur central.

En outre, afin de réduire les attaques ou les écoutes clandestines sur le réseau CPL, les standards CPL les plus récents mettent en place une politique de sécurité qui prend en compte le cryptage, l'authentification des équipements et le contrôle de l'intégrité des données.

Le cryptage des données est fondé sur la technique AES 128 bits en mode CPC (Cipher Block Chaining). La protection des données est quant à elle effectuée par cryptage à l'aide d'une clé NEK (Network Encryption Key). Cette clé est dérivée d'une passphrase utilisée par les utilisateurs ou automatiquement générée par l'utilisation du mode « easy connect » activable par un bouton sur les boîtiers. La clé NEK est l'équivalent de la clé WEP ou WPA ou le 802.11.

Dans le cadre du standard HomePlug AV, l'intégrité du réseau est garantie par une clé d'identification NMK (Network Membership Key) qui est gérée par un des équipements du réseaux CPL qui est élu Cco (Coordinateur – classiquement l'équipement qui est capable d'accéder à tous les autres équipements au niveau des couches PHY/MAC) par les autres STA (équipements en mode STA).

La figure 4 décrit la composition d'un équipement CPL avec une isolation entre les interfaces électriques et les interfaces RJ45 qui permet d'éviter un accès facilité aux trames cryptées qui circulent sur le média électrique.

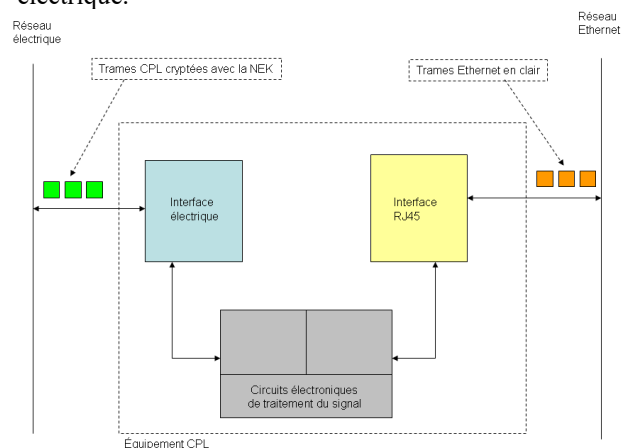


Figure 3 : Constitution d'un équipement CPL et isolation des interfaces CPL et RJ45

Contrairement aux attaques développées sur les réseaux Wi-Fi, il n'existe que très peu de cas où les réseaux CPL ont présenté une faille de sécurité.

8. La standardisation des technologies CPL

Ces dernières années ont vu l'utilisation massive des technologies CPL dans les réseaux domestiques pour les couches Ethernet/IP. Cette maturité s'est accompagnée d'un besoin de standardisation auprès de l'IEEE pour harmoniser les équipements réseaux disponibles sur le marché. La figure 4 représente un historique des différentes technologies et standards propriétaires depuis 1990 avec les dernières technologies HomePlug AV proposant un débit de 200Mbits/s partagé sur la couche PHY.

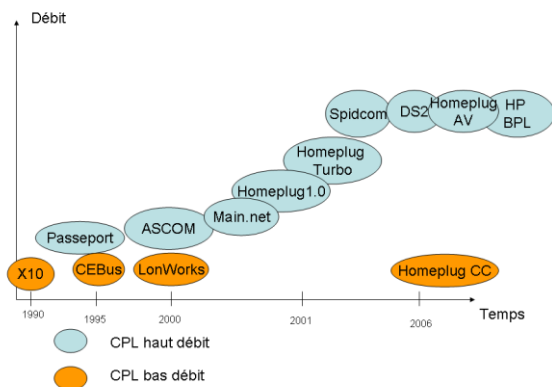


Figure 4 : Historique des différentes technologies CPL pour les bas et haut débits.

Comme pour de nombreuses technologies réseaux, la maturité d'un marché s'accompagne d'un groupe de travail IEEE qui propose un standard suivi par les différents équipementiers réseaux. Dans le cadre des CPL haut débit, le groupe de travail P1901 a publié le draft du standard 1901 en Janvier 2010 qui est inter-opérable avec le standard industriel HomePlugAV permettant (<http://grouper.ieee.org/groups/1901/>). Ce standard décrit la couche PHY et la couche MAC (définissant des trames IEEE 802.3 transportées sur un média électrique).

9. Les Réseaux CPL indoor

Il est commun de séparer les utilisations des technologies CPL entre le réseau électrique dit « indoor » utilisant le réseau électrique privé et le réseau électrique « outdoor ». Dans les réseaux CPL indoor, une des architectures les plus communes est l'utilisation de 3 ou 4 boîtiers CPL : un équipement connecté sur le boîtier Internet ADSL, un équipement connecté sur un le décodeur TV recevant les flux

vidéos UDP, un équipement CPL connecté sur un téléphone IP recevant les flux SIPoRTSPoUDP et finalement un quatrième boîtier connecté sur un PC domestique recevant les flux de données comme illustré sur la figure 5

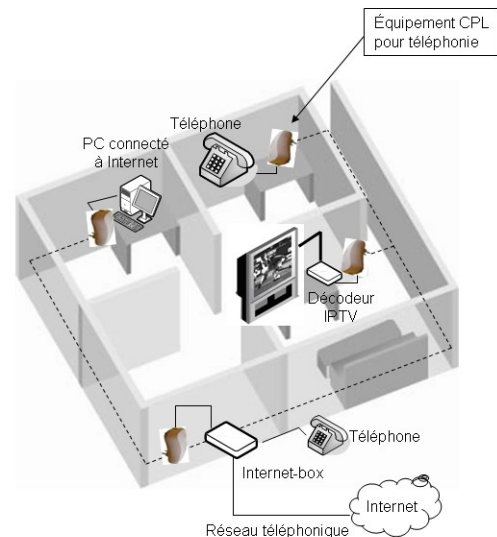


Figure 5 : Utilisation des technologies CPL dans le domaine indoor

La multiplication des offres dites multiplay (vidéo, voix, données) demande de plus en plus de débits et de connectivité dans l'environnement domestique ce que propose les standards HomePlugAV et IEEE 1901.

10. Les Réseaux CPL outdoor

Dans le domaine des réseaux outdoor hauts débits, les technologies CPL sont actuellement utilisées pour permettre des services IP Internet sur les lignes électriques publiques. Ces offres peuvent être proposées dans les environnements ruraux, semi-ruraux et urbains. Nombre de pays disposent désormais d'opérateurs électriques ou télécoms proposant des offres d'accès Internet par le réseau électrique public. La figure 6 représente une architecture d'accès Internet par un réseau électrique publique urbain connecté à une colonne montante d'immeubles atteignant les compteurs en tête de réseau électrique dans chaque appartement.

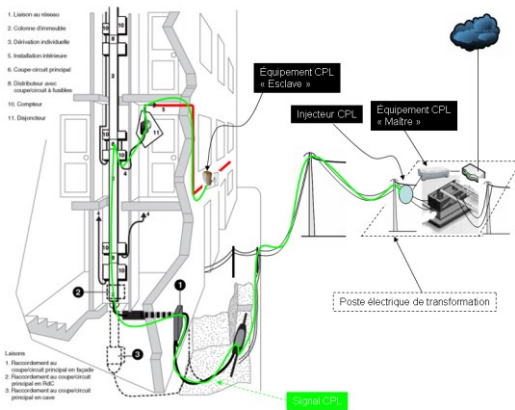


Figure 6 : Architecture d'un réseau CPL dans le domaine outdoor avec une application d'accès Internet en milieu urbain

Les technologies CPL peuvent également être utilisées dans le domaine électrique publique pour des services de connexion bas débits des compteurs électriques (maintenance, délestage, relevé ...). Les standards HomePlugCC et PLAN proposent des solutions techniques dans des débits inférieurs à 50Kbits/s.

11. Les réseaux CPL hybride

Comme les différentes générations de technologies réseaux ont pu le démontrer, il n'existe pas de technologie idéale pour les besoins réseaux. Dans ce cadre l'hybridation de plusieurs technologies offre de nombreuses réponses en alliant les avantages de chacune de ces technologies. Dans le cas des CPL, la technologie Wi-Fi semble très bien compléter la connectivité par le réseau électrique avec une interface air permettant une mobilité des stations connectées. Dans le cadre domotique, domestique avec les architectures réseaux de maisons intelligentes CPL et sans-fil permettent d'adresser les capteurs et stations en IPv4 ou IPv6. Le constructeur de SoC (System-on-Chip) propose une puce alliant le standard IEEE 1901 et le Wi-Fi 802.11n sus-nommée AR7400.

12. Futur des technologies CPL

Les technologies CPL vont continuer de se déployer et de permettre des connectivités faciles et à très hauts débits de stations IP en environnement domestique, tertiaire ou industriel. Les améliorations techniques que vont proposer des versions futures du standard IEEE 1901 seront destinées aux spécifications suivantes : débit accru vers 400Mbits/s ou 1Gbits/s (amélioration des codages/modulations, élargissement de la bande de fréquences, compression de données au niveau IP...), création d'une version intermédiaire « moyen débit » basée sur un mode de transmission et de modulation dit ROBO pour RobustOBO finalement utilisation d'IPv6 pour éviter la saturation et pénurie des adresses IPv4.

Bus de terrain et de supervision

Jean DEPREZ, IUT CACHAN

Jean-Louis BIANCHI, LYCÉE VERSAILLES

Joëlle MAILLEFERT, IUT CACHAN

Anthony JUTON, IUT CACHAN

Résumé : *Après une analyse de l'évolution des réseaux locaux industriels, l'article propose une présentation d'un protocole orienté terrain (Canopen) et d'un protocole orienté supervision utilisant Ethernet (MODBUS TCP). A partir d'une application industrielle, une approche pédagogique conduite à l'IUT de Cachan(GEII) décrit un support d'étude et son exploitation pédagogique.*

1. Introduction

L'enseignement des réseaux informatiques ne peut plus être abordé en 2010 suivant la même démarche pédagogique que celle qui était utilisée il y a une dizaine d'années. Ceci, bien sûr, du fait de l'évolution des technologies de communication mais aussi de la relation naturelle que les étudiants entretiennent avec ces technologies qui font partie intégrante de leur environnement. A titre d'exemple, les notions d'adresse IP, de routeur, de DHCP, sont faciles à expliquer aux étudiants habitués à se connecter à la "machin-box" de leur domicile ou au réseau WiFi de leur université. Mais cette relation, souvent basée sur une utilisation "plug & play" des équipements informatiques grand public, qui est dans l'ensemble remarquablement efficace, induit paradoxalement une déstabilisation et une grande naïveté devant les problèmes rencontrés lors de la mise en œuvres des réseaux locaux industriels.

L'évolution technique des réseaux et des équipements entre lesquels ils assurent le dialogue estompé également la classique vision pyramidale du modèle CIM (Computer Integrated Manufacturing). La segmentation, confortable, des réseaux qui découlait de ce modèle (réseaux de terrain, d'atelier, d'entreprise) perd sa légitimité. L'actionneur et le capteur de base des années 90 laissent place à des composants intelligents qui résolvent au niveau de la cellule de production des calculs et des traitements qu'il était naguère nécessaire de déporter au niveau de l'atelier ou de l'usine. Ainsi, un variateur de vitesse est à même d'assurer localement la gestion de profils de position, couple ou vitesse. Ses attentes du monde extérieur seront limitées aux éventuelles modifications de paramètres de ces profils. Par contre, il mémorisera et rendra disponible à ce monde extérieur des informations directement exploitables par la supervision de fabrication, la gestion des stocks ou la

maintenance préventive. De même les capteurs peuvent embarquer un calculateur qui assurera localement les procédures de diagnostic ou les algorithmes de traitement du signal. Enfin, certains protocoles jusqu'ici cantonnés à la supervision d'atelier ou d'entreprise sont maintenant capables de satisfaire les exigences du terrain, essentiellement grâce à l'augmentation de débit qui palie les faiblesses du protocole (Ethernet par exemple).

Le choix du réseau ne s'est pas toujours fait dans le passé en liaison avec les standards communément éprouvés et validés par le milieu professionnel. L'enthousiasme des universitaires pour le séduisant protocole FIP dans les années 90 était sans rapport avec son impact industriel. Par ailleurs, certains réseaux propriétaires ne se justifiaient que par la prédominance de certains types d'automates dans les établissements d'enseignement.

1.1. La définition d'une application

Entre la volonté de l'enseignant de donner à l'étudiant des notions sur les équipements qu'il va rencontrer dans sa vie professionnelle - et la pression des employeurs potentiels qui jugent naturel que l'étudiant soit familiarisé avec les technologies qu'ils utilisent - et la disponibilité d'un équipement de travaux pratiques, plusieurs phases sont nécessaires :

- Le choix des réseaux à mettre en œuvre au milieu de la multitude de solutions présentes sur le marché. Comme en entreprise, ce choix sera souvent tributaire du matériel existant déjà dans le laboratoire, l'interopérabilité restant du domaine de l'hypothèse. On tentera d'illustrer plusieurs familles de protocoles.
- La définition, la réalisation ou l'adaptation d'une application suffisamment simple et fiable pour que l'étudiant puisse appréhender facilement le processus mis en œuvre, mais suffisamment complexe pour que l'implantation de réseaux

locaux y trouve une justification. L'étudiant est difficilement convaincu par une application qui consiste à manipuler des interrupteurs pour allumer des LEDs.

- La préparation logicielle de l'application, permettant à l'étudiant d'aborder, éventuellement en plusieurs séances, les notions de configuration, paramétrage, exploitation, analyse du réseau. Bien que les logiciels utilisés soient de plus en plus conviviaux, ils sont avant tout destinés à des professionnels qui, par métier, par analogie, savent décoder des notices que les étudiants, pendant le temps nécessairement limité passé au laboratoire, sont incapables d'exploiter à l'état brut.

1.1.1. Critères de performance

Trois critères de performance sont décisifs quant au choix du réseau : déterminisme, rapidité, fiabilité.

Un réseau est dit déterministe, si, pour une configuration matérielle donnée, on peut déterminer le temps maximal que prendra un message pour atteindre son destinataire. Ce critère peut être crucial dans les applications de contrôle temps réel.

Le débit, exprimé en bit/s caractérise la capacité du réseau à transmettre des informations dans un temps limité. Pour les réseaux industriels il varie de quelques 10 kbit/s à quelques 100 Mbit/s. Le débit dépend du médium sur lequel circule l'information et de l'étendue du réseau. Ce critère sera primordial lors de l'échange de données volumineuses (images, fichiers de configuration par exemple).

Le taux d'erreur quantifie la probabilité de réception d'un bit erroné, sans détection ni correction d'erreur. Il dépend de la robustesse électrique du réseau (immunité au bruit) et du protocole de gestion des erreurs.

Les objectifs des réseaux de contrôle-commande sont de permettre :

- la communication entre les organes de commandes (API) et la partie opérative (capteurs, actionneurs, pré-actionneurs)
- la synchronisation et la communication entre organes de commande (intelligence répartie)
- l'utilisation d'entrées-sorties déportées
- les échanges avec les interfaces homme-machine (écrans tactiles)

Ils permettent d'autre part :

- de réduire les coûts de câblage (matériel et main d'œuvre)
- de faciliter l'évolution et la maintenance de l'application

- d'ajouter aux messages de processus, des messages liés à l'identification, à la surveillance et à la maintenance des équipements.

Ils sont caractérisés par un débit relativement faible (messages courts), des exigences de temps réel (déterminisme, criticité des échanges) et une grande robustesse (faible taux d'erreur). Les équipements connectés proviennent souvent du même équipementier.

Les réseaux de supervision (SCADA : Supervisory Control And Data Acquisition) ont pour but :

- de permettre le téléchargement des paramètres, voire des programmes, nécessaires au fonctionnement des différentes parties du système
- d'acheminer des informations de compte-rendu relatives à l'état des différentes parties du système
- d'assurer le rafraîchissement périodique des informations nécessaire à l'appréhension globale du fonctionnement de l'application
- de concentrer ces informations (base de données) en vue de leur exploitation par les logiciels de gestion de production (MES: Manufacturing Execution System) ou de gestion d'entreprise (ERP: Enterprise Resources Planning)

Ils sont caractérisés par un débit relativement élevé (nombreux messages), peu d'exigence temps réel (il s'agit de compte rendus d'interventions, pas des interventions elles-mêmes). Les équipements connectés sont souvent hétérogènes.

1.1.2. Protocoles de communications

Les protocoles d'acheminement des données se résument à deux grandes familles :

- Échanges adressés de données : chaque nœud comporte une adresse. Les trames qui acheminent les données comportent deux adresses: l'adresse de l'émetteur de l'information et l'adresse du destinataire de l'information (exemple : Ethernet)
- Échanges par diffusion de données: les trames qui acheminent les données comportent un identificateur propre à chaque donnée. Chaque nœud peut être consommateur et/ou producteur de données (exemple : CAN)

Les protocoles d'accès au réseau peuvent, eux aussi, se résumer à trois familles :

- Accès multiples au médium : chaque nœud est libre de transmettre une trame sur le réseau, après avoir testé la disponibilité du médium (CSMA: Carrier Sens Multiple Access). En cas d'accès simultané, la collision est détectée et entraîne le retrait :

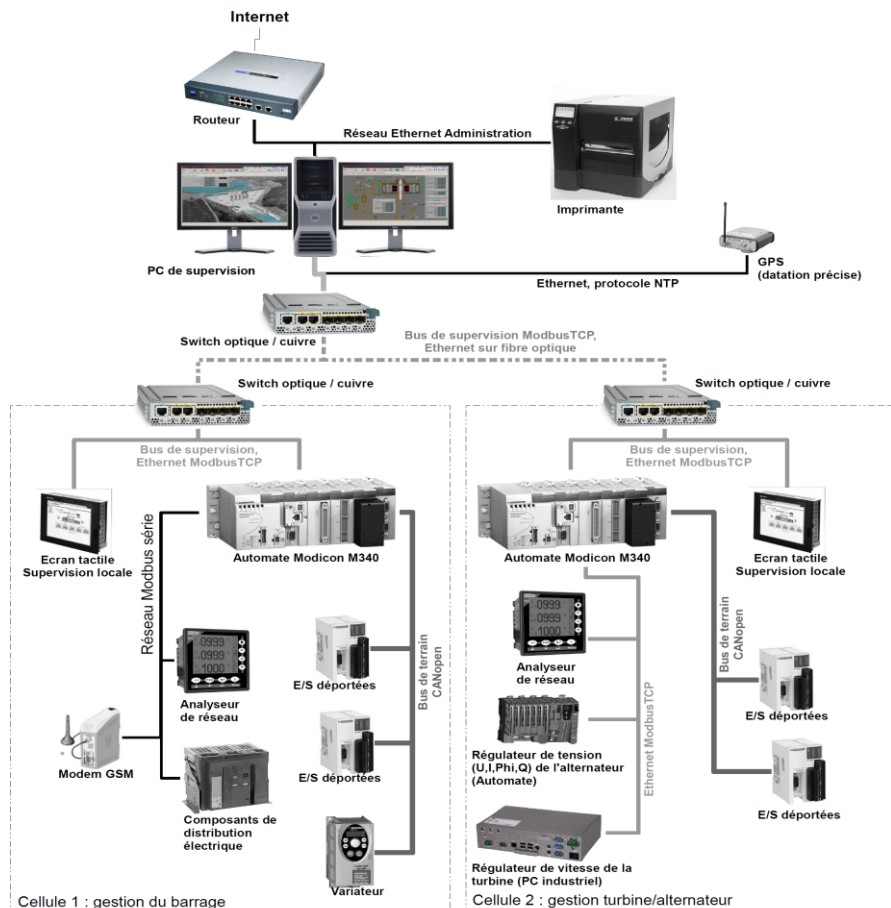
- de tous les émetteurs (CSMA-CD : Collision Detection) puis ré-émission dans des conditions prévues par le protocole (exemple Ethernet)
- de tous les émetteurs sauf celui qui émet la donnée la plus prioritaire (CSMA-CA : Collision Avoidance) (exemple CAN)
- Échanges maître – esclaves : un des nœuds (le maître) est à l'initiative de tous les échanges sur le réseau.
- Partage du temps de parole sur le bus (time sharing).

1.2. Un exemple industriel : une centrale Hydroélectrique Alstom

Pour illustrer ce propos, voici un exemple industriel d'une installation utilisant bus de terrain et bus de supervision, développée en partie par un apprenti de Polytech Paris Sud. Le système de contrôle-commande des petites centrales hydrauliques (<30 MW)

commercialisées par Alstom Hydro est proposé au choix autour d'automates B&R X20 avec un réseau de terrain propriétaire et un réseau de supervision moderne Ethernet PowerLink, ou d'automates Schneider Modicon M340 appréciés notamment sur le marché américain. Ces derniers utilisent un réseau Modbus TCP pour la supervision et un réseau CANopen pour le terrain. Les deux automates sont capables de dialoguer en Modbus série ou Modbus TCP (client) avec les équipements périphériques (analyseurs de réseaux, distribution électrique, PC industriel de régulation de la turbine).

La supervision globale est accessible depuis un ou plusieurs PC, en local ou à distance, les petites centrales fonctionnant souvent sans présence permanente. Cela justifie si c'était encore nécessaire l'intérêt d'un bus de supervision basé sur Ethernet TCP/IP. Des afficheurs de supervision permettent au technicien d'avoir accès à une supervision locale dans certains locaux techniques, au plus près des parties commandes.



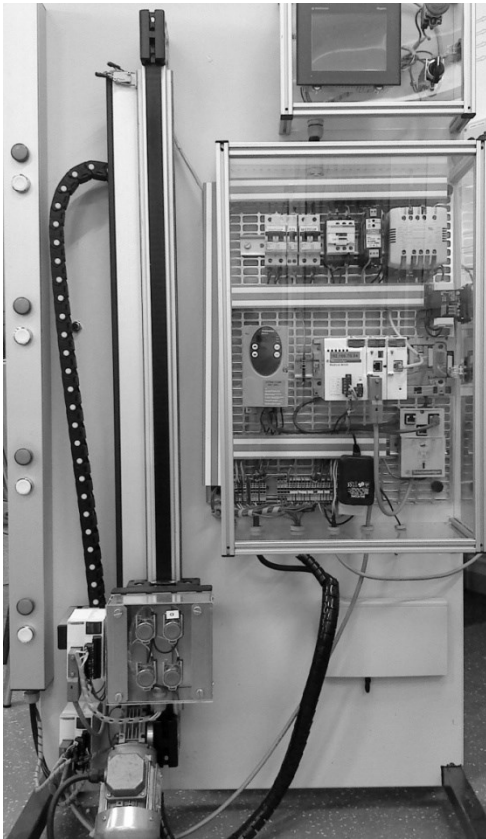
Les équipements et l'organisation réseau de la centrale Hydroélectrique Alstom

1.3. Un exemple pédagogique : l'ascenseur pédagogique de l'IUT

La Bièvre à Cachan n'ayant pas un débit suffisant pour installer une centrale hydraulique, nous avons

conçu un système automatisé reprenant cette architecture de manière plus compacte. Ce système devait de plus être transportable dans les salons. Pour cette raison, nous avons choisi de réaliser un classique ascenseur. Le processus électromécanique étudié

(monte-charge) est simple à comprendre, il comporte un pré-actionneur intelligent (variateur), des capteurs fixes et embarqués.



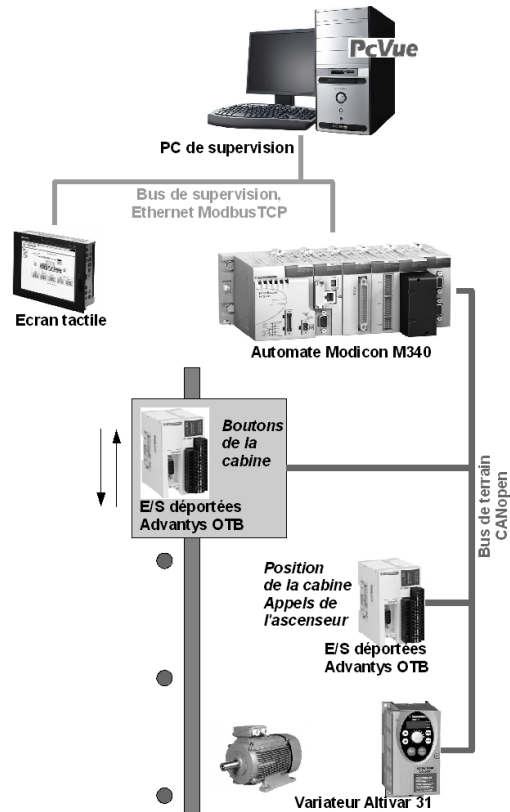
La partie commande est articulée autour d'un automate Schneider **Modicon M340**. L'automate, moderne, accepte les 5 langages de programmation IEC et communique nativement en Modbus, Modbus TCP et CANopen.

Le PC de supervision utilise le logiciel **PCVue** de Arc Informatique, choisi pour sa qualité et pour le nombre de licences vendues en Europe. Un écran de supervision aussi communique avec l'automate via le réseau Ethernet Modbus TCP.

Modbus TCP a été retenu car il est de loin le plus simple des réseaux fonctionnant sur Ethernet TCP IP. Cette simplicité lui vaut d'être très répandu dans l'industrie, en particulier dans les appareils « peu intelligents » dialoguant sur Ethernet (analyseur de réseau, équipements météo, etc...). Modbus TCP est ouvert, les spécifications sont disponibles, l'outil gratuit de capture et d'analyse du réseau Ethernet Wireshark décode les trames Modbus TCP.

Le réseau Ethernet Modbus TCP véhicule ici les informations destinées à la supervision : position interpolée de la cabine, courant dans le moteur. PCVue est client modbus TCP.

L'axe vertical est un axe linéaire Elcom entraîné par un moteur asynchrone de 60 W. L'architecture de la partie commande est la suivante :



Les équinements et réseaux de l'application

L'automate communique avec le variateur Altivar 31 et les deux modules d'entrées/sorties déportées Advantys OTB via le bus **CANopen**. CANopen est un des 3 bus de supervision les plus représentés au niveau de l'automatisme de l'industrie « manufacturière » (qui se différencie de l'automatisme de l'industrie « de process » concernant les processus continus) : CANopen, DeviceNet et Profibus. Dans l'article sur les variateurs de vitesse de la revue Mesures de novembre 2008, on peut voir que parmi les fabricants de variateurs, 90% proposent au moins un variateur communiquant en Profibus, 71% en CANopen et 67% en DeviceNet. On trouve ensuite Modbus série (57%), puis LonWorks (33%, orienté gestion technique de bâtiment) et Interbus (23%). Fin 2008, chacun des protocoles basés sur Ethernet (EtherCat, Ethernet PowerLink, Ethernet/IP, ProfiNet, Modbus TCP, Sercos III) était disponible chez moins de 20% des fabricants de variateurs.

Le protocole CANopen utilise le bus CAN, bien connu à l'IUT. CAN et CANopen sont deux protocoles ouverts dont les spécifications sont accessibles facilement et pour lesquels des outils de diagnostic bon marché sont disponibles.

Le réseau CANopen véhicule les informations liées au process : capteurs inductifs des étages, sens de rotation et vitesse du moteur, courant dans le moteur, appels de l'ascenseur, commandes de la cabine.

L'article présentera CANopen d'abord puis Modbus TCP ensuite avant de revenir sur l'exploitation de l'application pour une illustration pédagogique du thème.

2. CANopen, un bus de terrain orienté automatisme industriel

Cette partie a pour ambition de présenter les notions clés de CANopen, sans entrer dans les détails qui pourraient perdre le lecteur. L'ensemble des spécifications de CANopen est disponible gratuitement sur le site de l'association CAN in Automation (<http://www.can-cia.org>) après enregistrement. La lecture de ces spécifications reste abordable pour une personne familière des notions réseaux habituelles.

CANopen est né en 1993 de la volonté d'un groupe de fabricants d'équipements d'automatismes de normaliser les échanges sur le bus CAN pour simplifier le développement d'applications et permettre l'interopérabilité des équipements, ceci pour permettre aux fabricants d'automates de proposer des solutions réseaux intégrant des équipements complémentaires à leur offre (variateurs, vannes, codeurs...). Le premier objectif fut la création d'un module d'entrées/sorties déportées.

2.1. CANopen, couche applicative du bus CAN

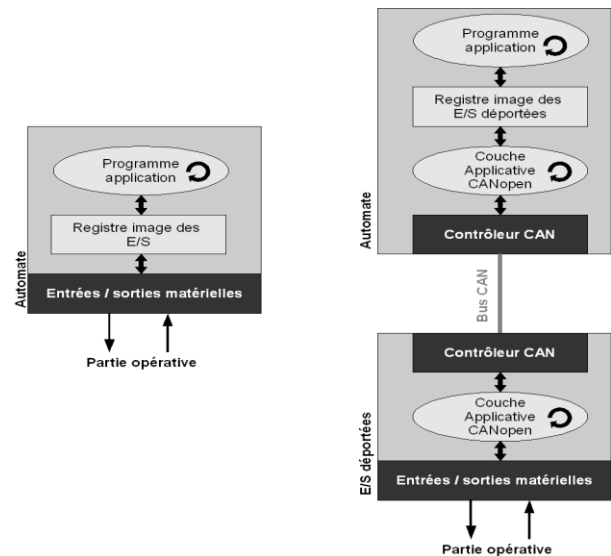
CANopen comme DeviceNet, sont des couches applicatives utilisant le protocole CAN comme couche physique et couche de liaison. L'étude de CANopen est très similaire à celle de DeviceNet.

Pour expliquer ce qu'est la couche applicative, reprenons l'objectif initial de CANopen : créer des entrées/sorties déportées s'utilisant de manière transparente, comme des entrées/sorties locales.

Sur le schéma ci-dessous sont présentés sur la gauche un automate avec des entrées/sorties locales et sur la droite l'association d'un automate et d'un module d'entrées/sorties déportées reliés en CANopen.

La couche applicative est une tâche (donc un élément logiciel) tournant en parallèle avec le programme de l'application dans l'automate. Elle est aussi active dans le module d'entrées/sorties déportées. Elle utilise les contrôleurs CAN (éléments matériels) des deux équipements pour faire en sorte que à tout moment les valeurs des entrées issues de la partie opérative se retrouvent dans le registre image de ces entrées dans l'automate et que les valeurs des sorties

modifiées par l'automate dans le registre image des E/S déportées soient transcrites au niveau de la partie opérative.



2.2. Le bus CAN en quelques mots

Difficile de présenter le bus CAN en quelques lignes, celui-ci n'étant pas le centre de notre propos. Le bus CAN (Controller Area Network), a été conçu pour l'automobile en 1986 par la société Bosch. Temps de conception oblige, la première voiture équipée d'un bus CAN sortit en 1991 mais déjà, le bus CAN commençait à trouver sa place dans l'automatisme industriel.

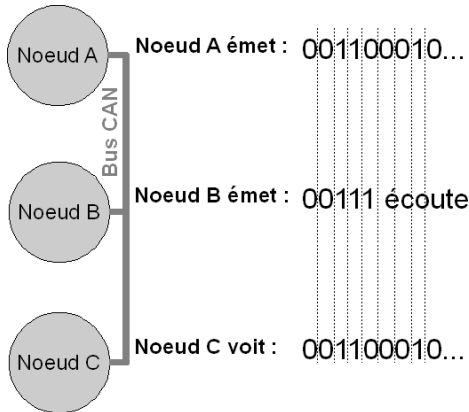
Les promoteurs du bus CAN mettaient en avant sa robustesse (très bonne détection des erreurs par de multiples procédés) et son déterminisme (il n'y a pas de collisions, donc on peut calculer le temps maximal qui va s'écouler entre la demande d'émission d'un message par un nœud et sa réception par un autre).

2.2.1. L'arbitrage

Le principe d'un bus est la possibilité pour plusieurs équipements (appelés nœuds) d'envoyer des messages sur le câble du bus, messages pouvant être reçus par les autres nœuds. Un seul potentiel électrique étant possible à un instant t sur le bus, il est nécessaire de gérer la prise de parole sur le bus pour qu'un seul équipement ne parle à la fois. On parle d'arbitrage.

Le bus CAN repose sur l'utilisation d'un niveau dominant (le 0) et d'un niveau récessif (le 1) et sur le fait qu'un bit doit être reçu par tous avant l'émission du suivant. Comme habituellement sur un bus, les nœuds (équipements reliés au bus) écoutent le bus avant d'émettre et pendant qu'ils émettent. Lorsque le bus est libre, à la fin d'un message précédent par exemple, deux nœuds peuvent commencer à émettre en même temps (les nœuds A et B sur la figure ci-dessous).

Lorsque A et B émettent le même niveau, sur le bus apparaît le niveau indiqué. Dès que le niveau est différent (5ème bit ici), le 0 domine et apparaît sur le bus. Le nœud émettant un 1 à ce moment voit que le niveau sur le bus n'est pas celui de la trame qu'il envoie. Il passe alors en écoute. Il essaiera d'émettre plus tard.

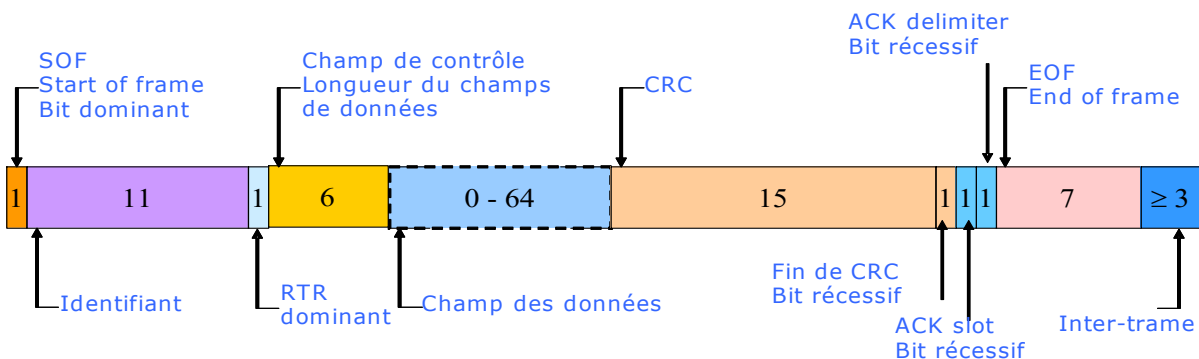


La parole est laissée à celui qui parle le plus fort. Cette manière de gérer l'accès au bus fait qu'aucun bit ne passant sur le bus n'est inutile. Cet arbitrage limite par contre le débit, le bit devant être reçu par tous les nœuds avant l'émission du suivant. Pour un bus de 40m, on est limité à 1Mbits/s, débit qui ne fait plus rêver aujourd'hui.

2.2.2. La trame CAN

Les premiers bits permettent de gérer la priorité des messages. C'est pourquoi, après un premier 0 indiquant la prise de parole sur le bus (Start Of Frame), les 11 premiers bits sont utilisés pour l'identifiant du message.

Voici la description d'une trame de données CAN 2.0A. Cela sera suffisant pour illustrer notre propos sur CANOpen. Les chiffres au milieu des champs indiquent la taille des champs.



- SOF : Start Of Frame, un bit dominant indiquant la « prise de parole » sur le bus.
- Identifiant : 11 bits, il est porteur de la priorité du message.
- RTR : dominant pour une trame de données.

- DLC : Longueur du champ de données, de 0 à 8 octets.
- Champ de données : message (température, position, on/off).
- Séquence CRC : calcul de vérification.
- L'ACK est remplacé par un bit dominant par tout nœud qui a reçu correctement la trame.
- EOF : séquence de 7 bits récessifs
- Inter-trame : au moins 3 bits récessifs

Pour que la priorité soit gérée avant le champ de contrôle DLC, un même identifiant ne peut être émis que par un nœud. Par contre un nœud peut émettre des messages avec des identifiants différents : des messages prioritaires avec des identifiants de valeur faible et des messages non prioritaires avec des identifiants de valeur élevée.

2.2.3. Émission en mode producteur-consommateur

Le bus CAN gère la priorité lorsque plusieurs nœuds souhaitent émettre en même temps. Chaque nœud peut ainsi tenter d'émettre lorsqu'il le souhaite. Un message émis est reçu par tous les nœuds du bus (qu'ils utilisent ou non le message). On parle de mode producteur / consommateur. Les nœuds étant successivement producteurs (émetteurs de données) et consommateurs (récepteurs de données). La télévision hertzienne ou la radio FM sont des exemples de communication en mode producteur/consommateur.

2.3. Les fonctions de la couche applicative CANOpen

Le bus CAN n'est-il pas suffisant pour échanger des messages entre deux équipements ? On pourrait effectivement échanger des informations via le bus

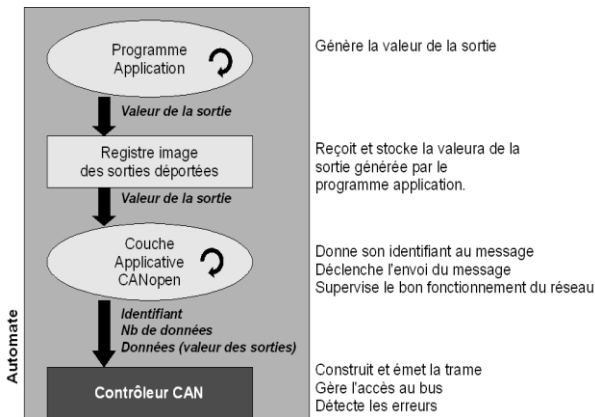
CAN, sans passer par une couche applicative logicielle. Cependant, il faudrait programmer les échanges de l'automate mais aussi ceux du module d'entrées/sorties déportées. Voici quelques autres raisons d'utiliser une couche applicative CANOpen normalisée :

- Celle-ci gère pour le programmeur de l'application la répartition des identifiants. De 2¹¹

identifiants différents à répartir, on passe à un niveau de priorité parmi 4 à choisir.

- La normalisation des échanges rend possible l'utilisation d'un module d'entrées/sorties déportées de n'importe quel fabricant, il se comportera comme des entrées/sorties locales.
- La supervision du bus est assurée, un mot système de l'automate reflète l'état du bus.
- Etc...

La figure suivante indique les rôles des 4 éléments clés dans la modification de la valeur d'une sortie déportée : le programme de l'application, le registre image des sorties déportées, la couche CANopen et le contrôleur CAN.



CANopen respectant parfaitement les spécifications du bus CAN, le contrôleur CAN est un contrôleur standard. Seul l'identifiant du message, le nombre de données et les données sont des champs que l'application peut remplir via la couche applicative logicielle. Les autres champs sont liés au protocole et remplis matériellement.

2.4. Structure d'un réseau CANopen

La couche applicative CANopen introduit par-dessus le protocole CAN (protocole basé sur des échanges type producteur/consommateur, sans différenciation des nœuds) la présence d'un maître et d'esclaves. La communication au niveau CANopen a toujours lieu entre le maître et les esclaves, jamais directement entre esclaves.

Chaque esclave CANopen possède un numéro de nœud, de 1 à 126. L'attribution se fait par des roues codeuses pour les nœuds CANopen simples. Il faut aussi indiquer à l'esclave le débit retenu (de 10 kbits/s à 1Mbits/s).

L'automate est le maître, c'est le seul élément que le programmeur doit configurer. Cette configuration consiste à indiquer les échanges souhaités entre le maître et les esclaves. Les messages sont nommés objets de communication, les identifiants sont renommés COB-ID (Communication Object Identifier). Voyons quels sont les messages susceptibles d'être échangés.

2.5. Trois types de messages

2.5.1. PDO : Process Data Object

C'est le message le plus simple, il est chargé de transporter les données liées au process (les valeurs des capteurs, les instructions envoyées aux actionneurs). C'est un message CAN brut, sans protocole supplémentaire :



Trame CAN d'un PDO

Les TPDOs (Transmit Process Data Object) sont envoyés au maître par l'esclave. Les RPDOs (Receive Process Data Object) sont envoyés par le maître vers un esclave déterminé.

L'esclave peut émettre un message TPDO lors d'un changement d'état d'une valeur échangée (mode asynchrone) avec ou sans limite d'occupation du bus (inhibit time) ou de manière périodique (mode synchrone).

La couche applicative CANopen se contente de donner l'identifiant 11 bits au message en fonction d'un niveau de priorité de 1 à 4 concaténé avec le numéro de nœud de l'esclave.

Type de message et priorité	Préfixe de l'identifiant	Numéro de nœud	Identifiant du message COB-ID
TPDO1	'0011	de 1 à 127	'0011 000 0001' (0x181) à '0011 111 1111' (0x1FF)
RPDO1	'0100		'0100 000 0001' (0x201) à '0100 111 1111' (0x27F)
TPDO2	'0101		'0101 000 0001' (0x281) à '0101 111 1111' (0x2FF)
RPDO2	'0110		Etc...
TPDO3	'0111		
RPDO3	'1000		
TPDO4	'1001		
RPDO4	'1010		

Voici l'exemple d'un TPDO2 envoyé par le nœud 2 de notre application et capturé par un CANalyseur. Au-dessus est présenté le résultat du décodage CANopen et au-dessous le résultat du décodage CAN.

TIME	NODE	OBJECT	DATA
01:17:59.621.7	1	TPDO 2	0F 00 00 00 00 00 00 00

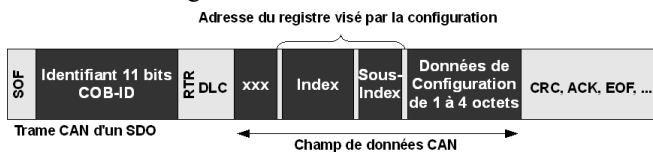
TIME	ID (HEX)	DATA (HEX)
01:17:59.621.7	0281	0F

Capture d'une trame PDO d'un module E/S déportées vers un API

Les données peuvent comporter de 1 à 8 octets. Les contenus et les priorités des messages sont configurés

Type de message et priorité	Préfixe de l'identifiant	Numéro de nœud	Identifiant du message COB-ID
TSDO1	'1011	de 1 à 127	'1011 000 0001' (0x581) à '1011 111 1111' (0x5FF)
RSDO1	'1100		'1100 000 0001' (0x601) à '1100 111 1111' (0x67F)

Pour indiquer le registre de l'esclave visé par le message de configuration, la première partie du champ de données est consacrée à l'adresse de ce registre (index et sous-index). La suite est consacrée aux données de configuration.



Les échanges se font en mode client-serveur. L'esclave est « serveur SDO » et le maître client. Il envoie des requêtes de modifications que l'esclave exécute et acquitte.

Voici un exemple capturé par le CANalyseur sur notre application. Il s'agit de la modification du Heartbeat time (cf paragraphe suivant), valeur située dans le registre 0x1017, sous-index 0. On passe la valeur à 5000 ms (5000 = 0x1388). En haut, on trouve le résultat du décodage CANopen et dessous le résultat du décodage CAN.

TIME	NODE	OBJECT	DATA
01:14:29.151.5	1	SSDO-Req WR	1017/00 88 13
01:14:29.152.9	1	SSDO-Rsp	1017/00 Init Sequence Ok

TIME	ID (HEX)	DATA (HEX)
01:14:29.151.5	0601	2B 17 10 00 88 13 00 14
01:14:29.152.9	0581	60 17 10 00 00 00 00 00

Capture d'un échange SDO entre un module E/S déportées et un API

On voit bien l'échange de type client serveur avec d'abord le RSDO, requête envoyée par le maître et juste après la réponse de l'esclave via un TSDO.

2.5.3. Démarrage, Arrêt, Supervision du bus

Des messages nommés NMT (Network Management) permettent de faire passer le bus du

via le logiciel de programmation/configuration du maître.

2.5.2. SDO : Service Data Object

Pour envoyer cette configuration depuis le maître vers l'esclave, CANopen utilise un autre type de messages nommé SDO (Service Data Objects). Ces messages ont un niveau de priorité fixé moindre que les PDOs. L'identifiant est créé par CANopen en concaténant le type du SDO (TSDO pour esclave vers maître et RSDO pour maître vers esclave) avec le numéro du nœud.

mode arrêté (pas d'échange) au mode PRE-OPERATIONNEL (configuration par le maître des esclaves via les SDOs) puis au mode

OPERATIONNEL (échanges des données liées au process via les PDOs).

De plus, pour vérifier le bon fonctionnement de chaque nœud, un protocole nommé Heartbeat ou Nodeguarding demande à chaque nœud d'envoyer périodiquement un message peu prioritaire ('1111 suivi du numéro du nœud) indiquant son bon fonctionnement. Le maître permet de configurer la période de ce « battement de coeur », pour chaque esclave.

Enfin, pour les PDOs synchrones, un message nommé SYNC envoyé par le maître déclenche l'envoi des PDOs synchrones.

Le tableau ci-dessous résume l'ensemble des messages normalisés en CANopen. Error Control correspond aux messages Heartbeat ou Nodeguarding. La zone 680h à 6FFh est disponible pour des messages spécifiques non normalisés. Nous n'aborderons pas ici les messages Time Stamp et Emergency Object.

Object	Function Code	Identifiant
Network Management Control (NMT)	0000	000h
Synchronization (SYNC)	0010	080h
Time Stamp	0011	100h
Emergency Object	0001	081h – 0FFh
PDO1 Transmit	0011	181h – 1FFh
PDO1 Receive	0100	201h – 27Fh
PDO2 Transmit	0101	281h – 2FFh
PDO2 Receive	0110	301h – 37Fh
PDO3 Transmit	0111	381h – 3FFh
PDO3 Receive	1000	401h – 47Fh
PDO4 Transmit	1001	481h – 4FFh
PDO4 Receive	1010	501h – 57Fh
SDO transmit	1011	581h – 5FFh
SDO receive	1100	601h – 67Fh
Error Control and Boot-up (NMTE)	1110	701h – 77Fh

Pour conclure ce paragraphe, nous pourrions reprendre une séquence classique :

1 – Message NMT « passage en mode PRE-OPERATIONNEL »

2 – Echanges des SDOs sous la conduite du maître pour envoyer la configuration de chaque nœud (configuration effectuée dans le logiciel de programmation de l'automate maître) vers les esclaves.

3 – Message NMT « passage en mode OPERATIONNEL »

4 – Echanges de PDOs liés au process (informations issues des capteurs, commandes des actionneurs)

A partir de cet instant, tout se passe dans le programme comme si les entrées/sorties étaient locales, avec un temps de réponse du réseau tout de même lié au débit et aux nombres d'entrées/sorties à rafraichir (à 250 kbits/s, un message PDO dure 200 µs).

Le travail du programmeur consiste essentiellement à configurer CANopen du point de vue matériel (numérotation des nœuds, choix d'un débit) et logiciel (répartition des données sur les 4 niveaux de priorité possibles, choix du type d'envoi des PDOs). La configuration logicielle du réseau CANopen se fait via le logiciel de programmation de l'automate.

Comment cela se passe-t-il quand le périphérique CANopen relié à l'automate est inconnu du logiciel (parce que plus récent que le logiciel par exemple) ? La réponse est dans le paragraphe suivant...

2.6. Le dictionnaire d'objets

Quand un électronicien souhaite établir la communication entre un microcontrôleur et un nouveau composant électronique, il ouvre la feuille des spécifications (datasheet) de ce dernier pour connaître la nature des informations à envoyer/recevoir pour un fonctionnement correct du nouveau composant. De la même manière, les spécifications des périphériques CANopen sont décrites dans un fichier normalisé nommé Electronic Datasheet (EDS). Ce fichier, fourni par le fabricant du périphérique CANopen, est un fichier texte normalisé qui sera compris par le logiciel de configuration du réseau (qui est aussi le logiciel de programmation de l'automate). Il contient les noms et adresses (index et sous-index) de l'ensemble des registres du périphérique. La liste de tous ces « objets » (registres) est appelée dictionnaire d'objets.

Voici ci-dessous un extrait de la documentation (adressée au programmeur) d'un module d'entrées/sorties déportées et, juste en dessous, l'extrait du fichier EDS correspondant.

Objet 1017H : Producer Heartbeat Time

Description

Cet objet permet de configurer l'intervalle en ms auquel le module doit produire le message Heartbeat.

La méthode de surveillance par défaut est le Node-Guarding. Si une valeur non-nulle est écrite dans cet objet alors le mécanisme du Heartbeat est utilisé.

Caractéristiques de l'objet

Les caractéristiques de cet objet sont données dans le tableau suivant :

Sous-Index	Description	Type de données	Valeur par défaut	Accès	Mapping PDO	Sauvegardé
0	-	UNSIGNED16	0	rw	non	oui

Si le protocole de surveillance d'erreur Heartbeat est choisi, le producteur émet un message Heartbeat de façon périodique, selon le paramètre "Producer Heartbeat Time". Les nœuds chargés de surveiller ce message (Heartbeat Consumer) génèrent un événement Heartbeat si le message n'est pas reçu dans le temps configuré (Consumer Heartbeat Time).

La description des spécifications des équipements dans un fichier est un concept qui a eu un grand succès dans les bus de terrain. Des tentatives ont même lieu pour normaliser les fichiers de description de tous les bus de l'automatisme en un seul standard nommé FDI (Field Device Integration).

2.7. Les profils CANopen

La normalisation de CANopen a conduit à imposer les index, les unités et les valeurs possibles pour les objets liés au fonctionnement du bus (Heartbeat time, mode de transmission des PDOs, etc...). La

normalisation visait à l'origine à permettre l'utilisation d'un module d'entrées/sorties déportées sans avoir à tenir compte du fabricant. Cela a conduit à normaliser un profil « module d'entrées/sorties déportées » où les éléments essentiels de ces modules (les entrées tout ou rien, les sorties tout ou rien, les entrées analogiques, etc...) sont des objets ayant les mêmes index, unités et configurations par défaut. C'est le profil CiA 401.

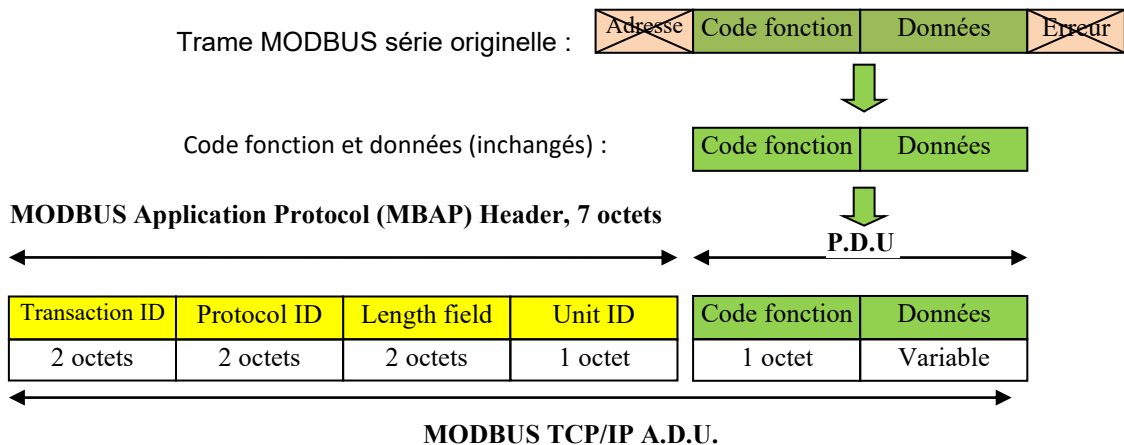
Pour laisser la place à l'innovation tout de même, en marge du profil « officiel », une place est laissée pour des objets spécifiques (par exemple, le module utilisé à l'IUT possède des entrées compteurs rapides et des sorties PWM).

[1017]

```
ParameterName=Producer
Heartbeat Time
ObjectType=0x7
DataType=0x0006
AccessType=rw
DefaultValue=0x0
PDOMapping=0
```


MODBUS TCP/IP utilise le protocole TCP/IP et le réseau physique ETHERNET pour acheminer les données des messages du protocole d'application

MODBUS entre machines compatibles, dans une trame TCP :



Evolution de la trame de base MODBUS vers l'A.D.U. MODBUS/TCP

Les commandes MODBUS et les données elles mêmes sont encapsulées dans un conteneur sans être modifiées, par contre, le contrôle d'erreur originel n'est pas utilisé puisque le contrôle d'intégrité des messages sera assuré par l'utilisation du standard ETHERNET

TCP/IP. L'adresse esclave habituellement utilisée avec MODBUS série sera remplacée par le routage propre à ETHERNET TCP/IP. Le tableau suivant décrit les champs :

CHAMP	LONGUEUR	DESCRIPTION
IDENTIFIANT de TRANSACTION	2 octets	Permet d'établir une association requête/réponse lors d'une transaction client/serveur. Si plusieurs requêtes sont émises cette ID permettra d'associer la réponse correspondante à la requête.
IDENTIFIANT de PROTOCOLE	2 octets	Toujours 0 pour les services MODBUS.
LONGUEUR DU CHAMP	2 octets	Contient le nombre d'octets du champ restant, incluant l'octet d'identification d'unité, l'octet du code fonction et les octets de données.
IDENTIFIANT d'UNITE	1 octet	Numéro d'unité pour les équipements joints au travers d'une passerelle ou un pont.

3.1.2. La connexion client/serveur avec MODBUS :

MODBUS TCP, comme cela a été évoqué ci-dessus, utilise une connexion de type CLIENT/SERVEUR. L'unité de données d'application (A.D.U.) décrite plus haut, est construite par le client qui initie une transaction (requête) vers un serveur :

Le serveur MODBUS/TCP :

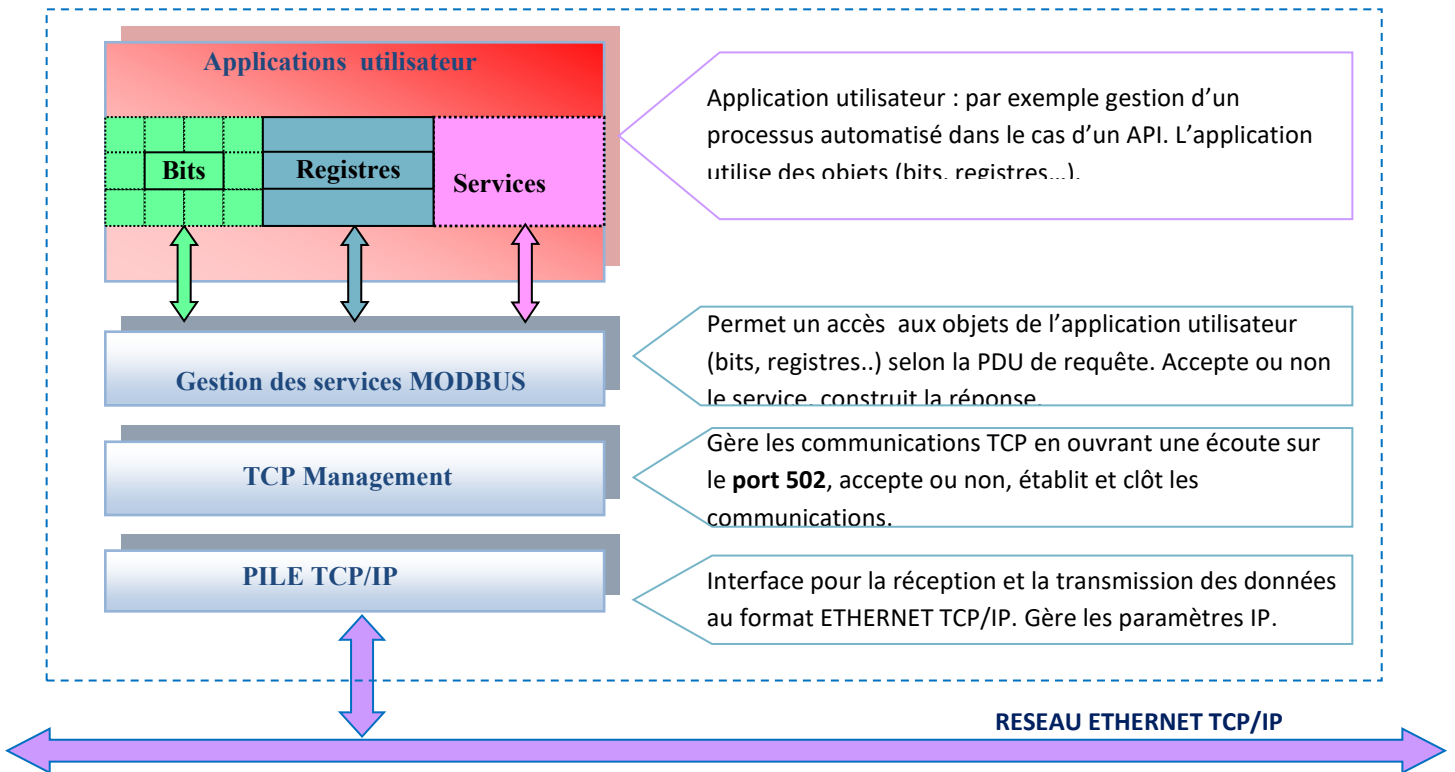
Le rôle du serveur est de fournir un accès à des objets concernant l'application ainsi qu'à des services, aux clients connectés. Deux types d'accès sont possibles :

- Des accès simples permettant d'obtenir ou définir l'état d'objets tels que bits ou registres de la mémoire interne de l'équipement, par exemple un **automate** équipé du service de messagerie MODBUS TCP.

- Des accès avancés permettant le déclenchement de services d'applications spécifiques, par exemple changer le mode de fonctionnement d'un automate (Run ou Program).

Ces services, caractérisés par un code fonction MODBUS permettent à un ou plusieurs clients connectés de venir lire ou écrire des données dans la structure mémoire (bits et registres) de l'A.P.I. serveur par exemple. Elles sont donc partagées au niveau du serveur MODBUS/TCP par le processus automatisé de l'application automate et le service de messagerie MODBUS/TCP embarqué dans celui-ci.

L'architecture interne d'un composant serveur MODBUS comme un A.P.I. par exemple, se compose de quatre modules principaux :

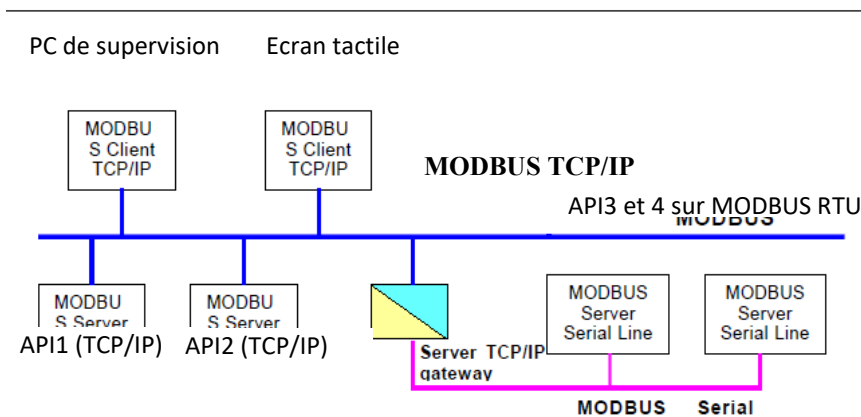


Modèle simplifié d'un serveur MODBUS/TCP

Le serveur MODBUS ouvre une écoute en attente d'une requête sur le **port TCP 502** réservé aux applications MODBUS, il peut traiter simultanément plusieurs requêtes, de 1 à 16 selon les paramètres de conception du serveur, mais il faut noter que le nombre de transactions traitées simultanément dégrade les temps de réponse du serveur aux requêtes clients.

Lors de la réception d'une requête d'un client, le serveur analyse l'entête MBAP de l'ADU MODBUS/TCP, si celle-ci est conforme, la transaction peut s'établir. Elle est initialisée avec une identification de connexion établie par le module TCP Management et avec les informations suivantes de l'A.D.U.:

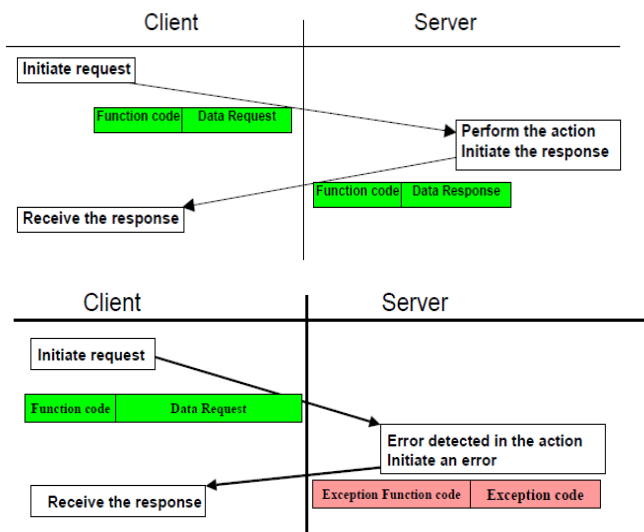
- L'ID de Transaction initialisée par le client contenu dans le MBAP est recopié par le serveur et incrémenté d'une unité à chaque transaction, établissant ainsi une association requête/réponse.
- L'ID d'unité qui permet de joindre une unité MODBUS en communication au travers de ponts, de routeurs ou de passerelles utilisant une adresse IP unique pour supporter plusieurs terminaux MODBUS indépendants sur un réseau série par exemple. Dans le cas d'un équipement serveur MODBUS/TCP, l'ID unité vaut 1.



Dans l'exemple ci contre on trouve un ensemble de clients/serveurs sur MODBUS TCP/IP, une passerelle TCP/IP vers MODBUS série permettant l'accès à deux équipements serveurs (API 3 et 4) sur MODBUS série. Chacun de ces serveurs sera identifié par son ID Unit (1octet) à partir de la trame MODBUS TCP/IP.

Quand la requête a été analysée, le serveur MODBUS/TCP peut fournir deux types de réponses :

- une réponse positive, avec une PDU précédée d'un MBAP établi à partir des informations du MBAP de la requête (ID transaction, ID unité, ID de protocole), il renseigne le champ de longueur indiquant la longueur de la PDU plus ID unité et place les données du service demandé avec son code fonction dans la PDU.
- Une réponse d'exception contenant un code d'exception dans le cas où la requête client a été rejetée.



Une transaction client/serveur sans erreur : le serveur répond en utilisant le même code fonction que celui contenu dans la requête du client. Si une erreur est détectée par le serveur un code d'exception est renvoyé.

Dans tous les cas, il est important de noter que toutes ces actions sont transparentes pour le programmeur de l'application.

Le client MODBUS/TCP :

La structure interne d'un client MODBUS est proche de celle du serveur du point de vue des modules de gestion des connexions, du routage et des applications MODBUS. Typiquement, un client MODBUS pourra être un **PC de supervision** par exemple.

Le module client MODBUS/TCP construit une requête à partir des informations de l'application, par exemple un logiciel de supervision. L'interface client MODBUS permet la construction de requêtes pour accéder aux services MODBUS d'un serveur. La gestion d'une transaction MODBUS par un client comprend :

- Initialisation de la transaction MODBUS, à partir des informations de l'application (supervision par exemple),
- Encodage de la requête (entête MBAP et PDU),
- Construction de la trame TCP/IP avec émission de la requête sur un port client TCP supérieur à 1024 :



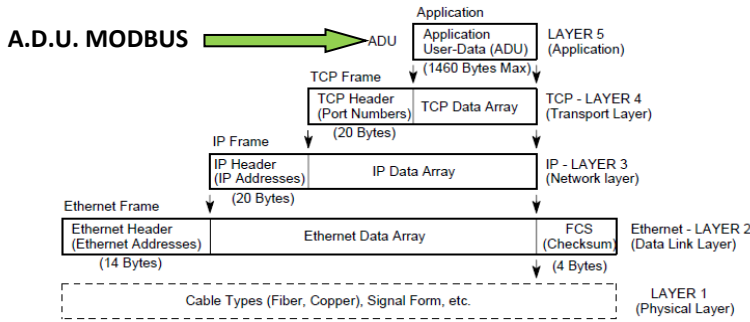
- Attente de la réponse du serveur.
- A réception de la réponse, l'identification de transaction (ID Transaction) permet au client de trouver la requête correspondante. Si celui-ci ne correspond à aucune requête connue émise par le client, la réponse est tout simplement ignorée.
- Analyse de la réponse, vérification de la conformité du code fonction qui doit être le même dans la réponse serveur que dans la requête client, vérification de la PDU.
- Confirmation de réponse positive ou négative (code fonction erroné) à l'application.

3.1.3. Le transport de la trame MODBUS sur ETHERNET TCP/IP :

MODBUS/TCP utilise le protocole TCP/IP et le media ETHERNET pour communiquer ; si on se réfère au modèle OSI de représentation normalisée des réseaux en couches, MODBUS TCP/IP utilise les 4 couches basses du modèle communes à tous les composants ETHERNET TCP/IP, l'application MODBUS couvrant les couches hautes 5,6 et 7.

Le client construit une requête (A.D.U. MODBUS/TCP) au niveau de la couche application, puis transmet ces données aux couches inférieures qui ajoutent leurs propres entêtes et parfois terminaisons protocolaires. Les données ainsi encapsulées forment des paquets TCP/IP et atteignent la couche physique où ils sont électroniquement transmis vers leur serveur de destination joint avec son adresse IP.

A réception par le serveur, les paquets sont décodés au niveau de chaque couche correspondante pour finalement atteindre la couche application MODBUS des données à traiter par le serveur.



Encapsulation de l'A.D.U. MODBUS/TCP dans la trame ETHERNET TCP/IP

Remarque : comme cela a été évoqué, le protocole ETHERNET TCP/IP n'est à l'origine pas destiné aux réseaux industriels dans la mesure où il n'est pas déterministe. Cela tient au protocole CSMA/CD d'arbitrage utilisé par Ethernet pour déterminer l'accès au réseau. Dans le cas habituel d'utilisation de switches, un retard important dans l'acheminement des

messages apparaît lors de la congestion d'un switch (débit entrant supérieur au débit sortant maximum possible).

3.1.4. Analyse de trames MODBUS TCP/IP :

L'observation de trames MODBUS/TCP sur un réseau ETHERNET TCP/IP permet d'illustrer les échanges client/serveur MODBUS entre un A.P.I. serveur et un PC client par exemple. Cela nécessite l'utilisation d'un outil logiciel d'exploration de réseau qui va permettre la capture des trames et leur analyse, tel que Wireshark. Précisons que cet outil est en téléchargement libre.

Voici un enregistrement effectué par Wireshark, il concerne les échanges entre un client (PC de supervision) et un automate MODICON serveur MODBUS :

Time	Source	Destination	Protocol	Info
3 0.035800	192.168.70.201	192.168.70.85	Modbus/TCP	query [1 pkt(s)]: trans: 5055; unit: 1, func: 3: Read multiple regis
4 0.043646	192.168.70.85	192.168.70.201	Modbus/TCP	response [1 pkt(s)]: trans: 5055; unit: 1, func: 3: Read multiple regis
5 0.043790	192.168.70.201	192.168.70.85	Modbus/TCP	query [1 pkt(s)]: trans: 5056; unit: 1, func: 4: Read input register
6 0.053666	192.168.70.85	192.168.70.201	Modbus/TCP	response [1 pkt(s)]: trans: 5056; unit: 1, func: 4: Read input register

La trame 3 émise par le PC dont l'adresse IP est 192.168.70.85 à destination de l'A.P.I. serveur dont l'IP est 192.168.70.85. Le protocole identifié est MODBUS/TCP, elle constitue une requête (Query), l'identifiant de cette transaction est 5055, l'identifiant d'unité est 1, le code fonction MODBUS est 3, il s'agit d'une lecture de plusieurs registres de l'A.P.I.

contient le même identifiant de transaction (5055) ce qui permettra au client d'associer cette réponse à sa requête (ID de transaction identique), le code fonction 3 est confirmé.

La trame 4 est la réponse émise par le serveur qui devient source à destination du PC client, elle

On constate qu'à chaque transaction (question/réponse) l'ID de transaction est incrémenté d'une unité. La trame 3 sélectionnée peut être analysée en détail du point de vue des différentes couches du réseau :

Frame 3 (66 bytes on wire, 66 bytes captured)

- Ethernet II, Src: Dell_79:dd:e5 (00:19:b9:79:dd:e5), Dst: Telemeca_03:a0:e3 (00:80:f4:03:a0:e3)
- Internet Protocol, Src: 192.168.70.201 (192.168.70.201), Dst: 192.168.70.85 (192.168.70.85)
- Transmission Control Protocol, Src Port: sabp-signal (3452), Dst Port: asa-app1-PROTO (502), Seq: 1, Ack: 1, Len: 12
- Modbus/TCP
 - transaction identifier: 5055
 - protocol identifier: 0
 - length: 6
 - unit identifier: 1
 - Modbus
 - function 3: Read multiple registers
 - reference number: 10
 - word count: 7

3.2. Le protocole d'application MODBUS :

3.2.1. Le mapping MODBUS :

Modbus permet au moyen du code fonction contenu dans la P.D.U. décrite plus haut, l'accès à la structure mémoire de la machine serveur. Il est ainsi possible pour le client connecté de venir lire ou écrire des bits

ou registres de cette mémoire et ainsi d'avoir accès à des données de l'application du serveur (processus automatisé par un A.P.I. ou paramètres d'un variateur, etc..). Cela suppose pour le serveur l'organisation des données accessibles selon un modèle MODBUS qu'on peut décliner en quatre tables :

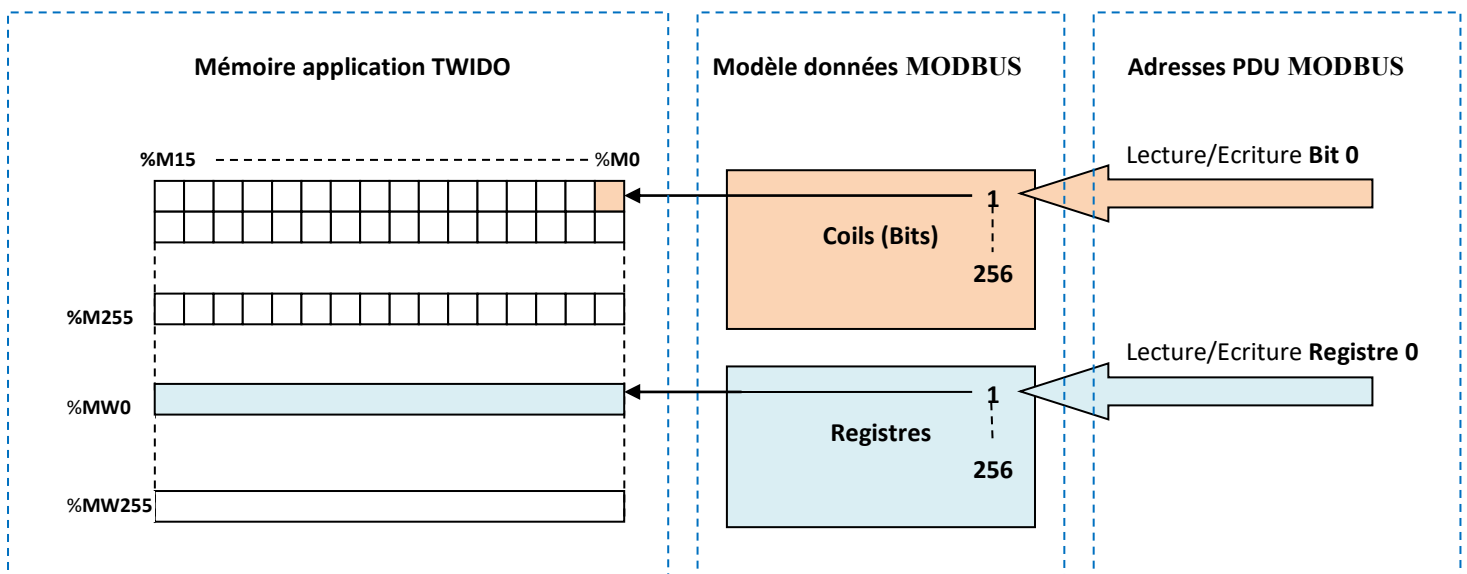
Tables de données	Type d'objets	Type d'accès	Commentaires
Entrées discrètes (discretes input)	Bit	Lecture seule	Données délivrées par le système d'entrées/sorties
Bobines (Coils)	Bit	Lecture/Ecriture	Données partagées avec l'application
Registres d'entrée (input registers)	Mot 16 bits	Lecture seule	Données délivrées par le système d'entrées/sorties
Registres internes (holding registers)	Mot 16 bits	Lecture/Ecriture	Données partagées avec l'application

Toutes les données (bits et registres) véhiculées par MODBUS correspondent à des points physiques de la mémoire de l'application, toutefois il est important de ne pas confondre l'adresse physique en mémoire avec la référence de donnée propre à MODBUS. Les adresses de données contenues dans la PDU MODBUS sont des entiers non signés débutant à la référence 0.

Le « Mapping MODBUS » définit comment MODBUS associe l'adresse d'une donnée passée par la PDU avec la donnée elle-même le tableau ci-dessous propose l'exemple d'accès à la mémoire par le service MODBUS pour l'A.P.I. TWIDO de Schneider ; dans le cas de cet A.P.I. le modèle de données MODBUS est réduit à deux tables :

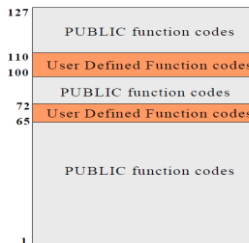
Services MODBUS	Adresses physiques mémoires API	Références MODBUS des éléments adressés	Code fonction MODBUS
Lecture/Ecriture de bits	Bits de %M0 à %M255	Bits de 1 à 256	01 pour la lecture
			05 pour l'écriture
Lecture/Ecriture de registres	Registres de %MW0 à %MW255	Registres de 1 à 256	03 pour la lecture
			06 pour l'écriture

Dans ce cas, le modèle d'adressage peut se représenter :



3.2.2. Les codes fonctions MODBUS :

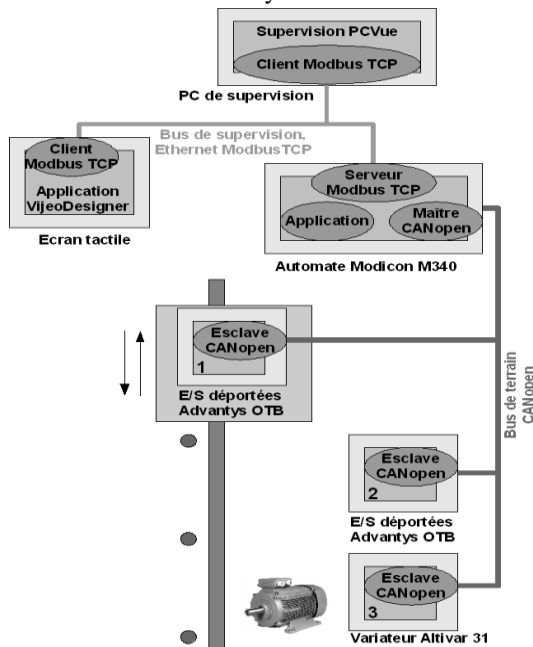
Les codes fonctions Modbus définissent le type de service requis, ils se classent en trois catégories : les codes fonctions dits publics qui sont définis par le standard Modbus, les codes fonctions utilisateurs qui sont au choix de l'utilisateur, les codes réservés aux fabricants :



Service MODBUS	Code fonction	Adresse début (PDU)	Mouvement de données
Lecture de bits (coils)	01	De 0x0000 à 0xFFFF	Lecture de 1 à 2000 bits
Ecriture d'un bit (single coil)	05	De 0x0000 à 0xFFFF	La donnée 0x0000 met le bit à 0 ; La donnée 0xFF00 met le bit à 1
Lecture de registres (16 bits)	03	De 0x0000 à 0xFFFF	Lecture de 1 à 125 registres
Ecriture d'un registre (16 bits)	06	De 0x0000 à 0xFFFF	Ecriture de donnée de 0x0000 à 0xFFFF
Lecture de registres d'entrée (16 bits)	04	De 0x0000 à 0xFFFF	Lecture de 1 à 125 registres d'entrées

4. Bus de terrain et de supervision sur l'ascenseur IUT

Après les développements théoriques liés au bus de terrain CANopen et au bus de supervision Modbus TCP utilisés à l'IUT de Cachan, voici une présentation de leur mise en œuvre et des résultats obtenus sur l'application « ascenseur ». Commençons par un schéma orienté réseau du système :



L'application ascenseur de l'IUT

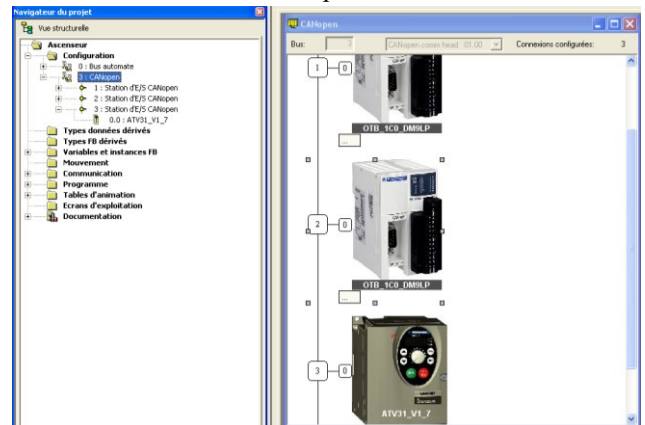
On trouvera la totalité des codes fonctions MODBUS et de la description du service associé à chaque code sur le site : <http://www.modbus.org>

En ce qui concerne les applications les plus courantes, notamment l'application support décrite ici, les codes fonctions utilisés sont : lecture/écriture de bits (coils), lecture/écriture de registres, le tableau suivant présente les codes fonctions Modbus correspondants :

4.1. Mise en oeuvre de CANopen

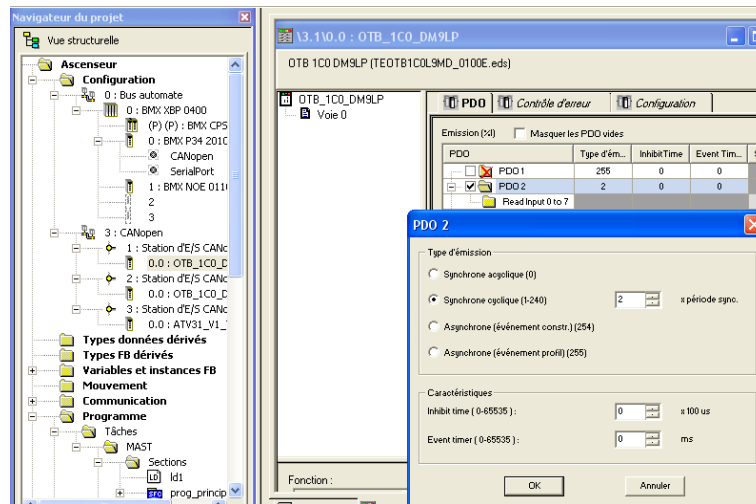
Le logiciel utilisé pour la programmation de l'automate Schneider Modicon M340 et la configuration de CANopen est Unity Pro. Tous les périphériques CANopen utilisés sont de marque Schneider, ce qui facilite leur intégration.

La première étape consiste à indiquer la constitution du réseau CANopen, à définir le débit :



Ensuite, pour chaque esclave, le programmeur peut utiliser la configuration par défaut du profil ou indiquer les messages de process (PDOs) qu'il veut utiliser et le type d'envoi.

La figure ci-dessous présente la configuration des entrées du module d'entrées/sorties 1 (boutons de la cabine) : envoi synchrone cyclique des valeurs des boutons (entrées 0 à 7) en réponse à un message SYNC



(message de synchronisation des envois de PDOs synchrones envoyé par le maître) sur deux

Pour notre application très simple, les configurations par défaut des périphériques seraient parfaites. Cependant, pour illustrer le fonctionnement de CANopen, la configuration suivante a été retenue.

- Maître (automate) : réseau à 250 kbits/s, message SYNC avec une période de 1s.
- Module d'entrées/sorties cabine, nœud 1 (profil entrées/sorties déportées) : envoi synchrone sur PDO2 (donc moins prioritaire) des valeurs des boutons de la cabine, tous les 2 messages SYNC (soit toutes les 2s). Heartbeat à 5 s
- Module d'entrées/sorties bâti, nœud 2 (profil entrées/sorties déportées) : envoi asynchrone, sur changement d'état, des valeurs des capteurs de position de la cabine et des boutons d'appel de l'ascenseur. La durée minimale entre deux envois de PDO est de 2 secondes. Heartbeat à 5 s.
- Variateur, nœud 3 (profil variateur) : configuration par défaut des PDOs, réception des consignes marche/arrêt, avant/arrière et vitesse ; envoi de la valeur du courant dans le moteur, Heartbeat à 5 s.

Remarque : Le variateur utilise une configuration par défaut avec des échanges de PDOs hors des plages normalisées. Les PDOs, appelés PDO6, utilisent les identifiants laissés libres pour des applications spécifiques. Ils ne sont donc pas reconnus dans les décodages CANopen.

Cette configuration « pédagogique » n'est évidemment pas judicieuse pour un bon fonctionnement, l'envoi des valeurs des boutons poussoirs de la cabine toutes les 2s est largement trop lent vis à vis de la durée de vie de l'entrée. Il faut appuyer longtemps.

Lors des montées rapides de l'ascenseur, la durée minimale de 2s entre deux envois des valeurs des capteurs de position conduit à un dépassement important des capteurs par la cabine.

Un module CANAnalyseur de capture CANopen est ajouté sur le réseau. Voici le récit des échanges sur CANopen :

4.1.1. Mode PRE-OPERATIONNEL : la configuration par les SDOs

Voici les relevés de captures issus de la période de configuration. La signification des registres correspondant aux index modifiés par les SDOs est donnée dans la datasheet du périphérique (soit la datasheet électronique, peu lisible, soit la datasheet pdf plus accessible au programmeur).

Quelques SDOs ciblés permettent d'illustrer la configuration par message de services.

TIME	NODE	OBJECT	DATA	
00:30:55.979.6		NMT	Node-Id = 1 -> ENTER PRE-OPERATIONAL STATE	Passage du réseau en mode PRE-OPERATIONNEL
00:30:55.983.8	1	SSDO-Req RD	1000/00 Init Sequence	
00:30:55.985.0	1	SSDO-Rsp	1000/00 91 01 03 00	
00:30:55.985.7	1	SSDO-Req RD	1018/01 Init Sequence	
00:30:55.987.0	1	SSDO-Rsp	1018/01 5A 00 00 05	
00:30:55.987.7	1	SSDO-Req RD	1018/02 Init Sequence	
00:30:55.988.9	1	SSDO-Rsp	1018/02 FB FE 00 00	
00:30:55.989.6	1	SSDO-Req WR	1011/01 6C 6F 61 64	
00:30:56.004.8	1	SSDO-Rsp	1011/01 Init Sequence Ok	Restoration des paramètres par défaut
00:30:56.005.1		NMT	Node-Id = 1 -> RESET NODE	
00:30:56.246.9	1	Nodeguard		
00:30:56.247.5	1	SSDO-Req WR	1016/01 2C 01 7F 00	
00:30:56.248.7	1	SSDO-Rsp	1016/01 Init Sequence Ok	Configuration du Heartbeat du noeud 1 à 5000 ms (0x1388)
00:30:56.249.4	1	SSDO-Req WR	1017/00 88 13	
00:30:56.250.8	1	SSDO-Rsp	1017/00 Init Sequence Ok	
...				
00:30:56.570.4	2	SSDO-Req WR	1800/01 82 01 00 80	Configuration de l'identifiant du PDO1 du noeud 2 : 0x182
00:30:56.571.9	2	SSDO-Rsp	1800/01 Init Sequence Ok	
00:30:56.572.5	2	SSDO-Req WR	1800/02 FF	Configuration du PDO1 en mode FF : asynchrone (envoi sur changement d'état)
00:30:56.574.0	2	SSDO-Rsp	1800/02 Init Sequence Ok	
00:30:56.574.7	2	SSDO-Req WR	1800/03 20 4E	Configuration du inhibit time à 2 s (0x4E20 = 20 000 * 100 µs)
00:30:56.575.9	2	SSDO-Rsp	1800/03 Init Sequence Ok	
...				
00:31:03.687.7		NMT	Node-Id = 0 -> START REMOTE NODE	Passage du réseau en mode OPERATIONNEL

4.1.2. Mode opérationnel : échanges de PDOs

Remarque : les boutons poussoirs utilisés dans la cabine (PDO2 du nœud 1) et sur le bâti (PDO1 du nœud 2) sont des boutons normalement fermés.

Les échanges avec le variateur utilisant des identifiants non normalisés, ils ne sont pas visibles sur les captures CANopen. Les captures CAN (non présentées ici) montrent bien leur passage.

Le Heartbeat du maître, à 200ms par défaut (modifiable ?) a été filtré pour ne pas encombrer les captures.

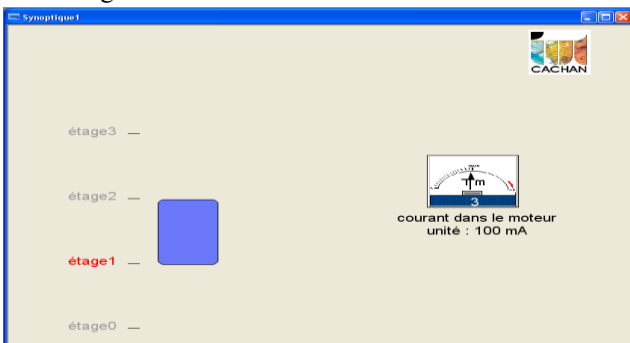
Les configurations choisies permettent d'illustrer :

- les envois de messages de process PDOs
- la supervision du réseau par Heartbeat (messages NodeGuarding)
- les modes d'envoi synchrones et asynchrones sur changement d'état
- l'effet du inhibit time
- les problèmes de durée de vie des entrées : un appui de moins de 2 sec d'un bouton de la cabine peut ne pas être pris en compte.
- les problèmes de temps réel : le retard dans l'envoi de l'état du capteur de position du à l'inhibit time du PDO1 entraîne de fort dépassement de la cabine.

TIME	NODE	OBJECT	DATA	
00:32:16.267.4	1	Nodeguard	OPERATIONAL	Heartbeat de chaque nœud, avec une période de 5s
00:32:16.333.1	2	TPDO 1	2F 00 00 00 00 00 00 00	
00:32:16.595.7	2	Nodeguard	OPERATIONAL	
00:32:16.666.1	3	Nodeguard	OPERATIONAL	Envoi du TPDO1 sur changement d'état du capteur de position de la cabine (activé 0,5 s environ), avec un minimum de 2s entre deux envois
00:32:16.701.7	1	TPDO 2	0F 00 00 00 00 00 00 00	
00:32:17.701.9	1	TPDO 2	0F 00 00 00 00 00 00 00	Apparition périodique du message de synchronisation SYNC, toutes les 1s.
00:32:18.332.9	2	TPDO 1	0F 00 00 00 00 00 00 00	
00:32:18.702.1	1	TPDO 2	0F 00 00 00 00 00 00 00	Le TPDO2 du nœud 1 (boutons de la cabine) apparaît de manière synchrone en réponse à un message SYNC sur 2
00:32:19.702.1	1	TPDO 2	0F 00 00 00 00 00 00 00	
00:32:20.702.3	1	TPDO 2	0F 00 00 00 00 00 00 00	Heartbeat de chaque nœud, avec une période de 5s
00:32:20.703.5	1	Nodeguard	OPERATIONAL	
00:32:21.268.5	1	Nodeguard	OPERATIONAL	
00:32:21.586.8	2	Nodeguard	OPERATIONAL	
00:32:21.668.5	3	Nodeguard	OPERATIONAL	
00:32:21.702.3	1	TPDO 1	1F 00 00 00 00 00 00 00	
00:32:21.762.5	2	TPDO 1	1F 00 00 00 00 00 00 00	

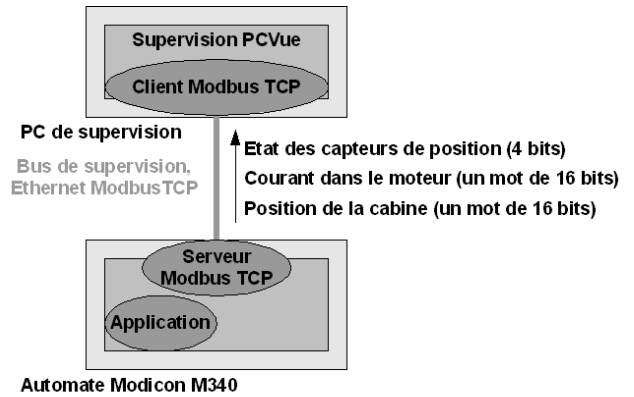
4.2. Mise en œuvre de la supervision via Modbus TCP.

La supervision très simple de cette application a été développée sur PCVue. Elle comporte une image de la cabine se déplaçant verticalement. Cette position de la cabine est calculée dans l'automate à partir des informations issues des capteurs inductifs de position et de la vitesse du moteur. La supervision affiche aussi l'état des 4 capteurs de position de la cabine et le courant dans le moteur, pour détecter d'éventuelles surcharges.



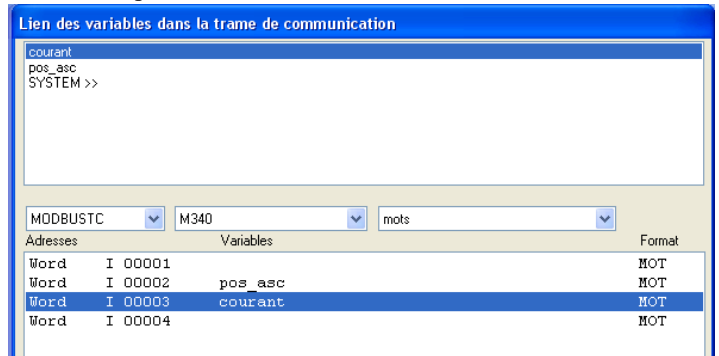
L'I.H.M. de supervision PCVUE

Le schéma ci-dessous indique les échanges (tous de l'automate vers le PC) ayant lieu sur le réseau Modbus TCP.



On effectue sous PCVue, client Modbus TCP, la configuration de la communication Modbus TCP : définition de l'adresse IP des serveurs Modbus TCP (ici l'automate), définition de la période des requêtes, définition des trames (code fonction, nombre de mots ou bits, adresse du premier mot ou bit).

Ensuite, on associe les mots ou bits Modbus TCP avec les variables PCVue, comme dans la figure ci-dessous pour les mots.



Une fois la configuration réseau effectuée, on lance la communication, on lance l'application et le logiciel de capture et d'analyse de trame Wireshark nous permet alors d'observer les échanges ayant lieu sur le réseau :

Adresses IP sources (Automate) et destination (PC)

Port source : 502 (port modbus TCP)

Situation de la trame décrite parmi l'ensemble des trames reçues.

Code fonction 4 : lecture de registre

Données : position de l'ascenseur 0x3684 et courant dans le moteur 0x3

L'objectif pour cette année est de rendre cette partie opérative « supervisable » depuis l'extérieur de l'IUT, de façon à mettre en évidence l'intérêt des bus de supervision sur Ethernet : Les paquets IP peuvent circuler sur le réseau Internet.

L'automate possède un serveur Web embarqué qui permet de superviser de manière simple le système à partir d'un navigateur internet. Il est prévu de rendre aussi accessible ce serveur Web embarqué depuis l'extérieur.

Le remplacement des équipements Schneider par des équipements CANopen hétérogènes est aussi à l'étude pour souligner l'interopérabilité de CANopen.

5. Le point de vue pédagogique

Nous enseignons ce module sur les bus industriels à des étudiants de 2ème année de DUT Génie Electrique, et de 2ème année de Cycle Ingénieur. Les exercices et les examens sont ajustés en fonction du niveau de formation. L'organisation pédagogique suit le schéma suivant :

- Thème N°1 : le réseau Ethernet et TCP/IP
- Thème N°2 : le réseau CAN
- Thème N°3 : le réseau CAN OPEN
- Thème N°4 : MODBUS et la supervision

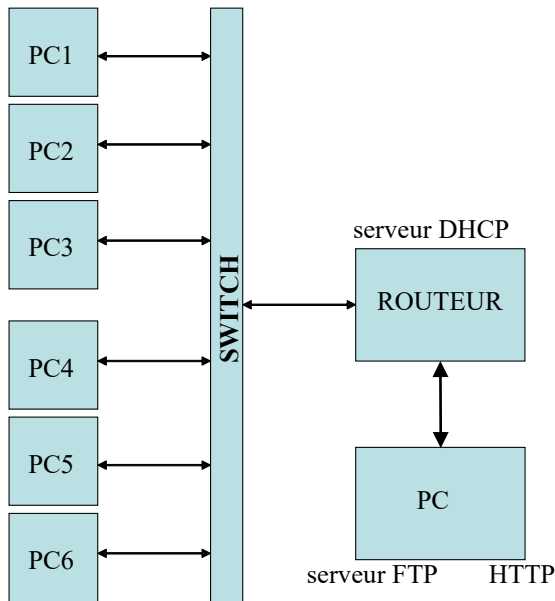
Pour chaque thème nous proposons un cours/TD de 3h/4h ainsi qu'un TP de 4h. Selon les cursus, ce module peut s'achever par un projet de quelques jours. Pour les Travaux Pratiques, nous utilisons du matériel et/ou logiciel standard du marché ou bien nos propres maquettes pédagogiques.

Voici la description du matériel pour un groupe de 6 binômes. Chaque binôme dispose d'un PC, non pris en compte dans le tableau.

Thème	Description	Coût
Ethernet	Un PC ordinaire servant de serveur + un switch + un routeur + logiciel d'analyse de trames Wireshark (gratuit) + logiciel Apache (gratuit).	60€ x 1 (hors PC)
CAN	Maquette pédagogique à base de microcontrôleurs PIC.	50€ x 6
CAN	Programmeur de microcontrôleur PIC + logiciel de développement MPLAB (gratuit)	100€ x 1
CAN	Facultatif : analyseur logique capable d'interpréter la trame CAN, un oscilloscope standard suffit !	5000€ pièce
CAN OPEN	Maquette pédagogique à base d'automate programmable TWIDO SCHNEIDER et de l'outil de développement TWIDO SUITE.	1000€ x 6
MODBUS Supervision	Logiciel PC Vue – version de démonstration (gratuite). Le nombre de variables est limité à 25 (suffisant pour nos applications). La version complète coûte environ 1000€ par licence	

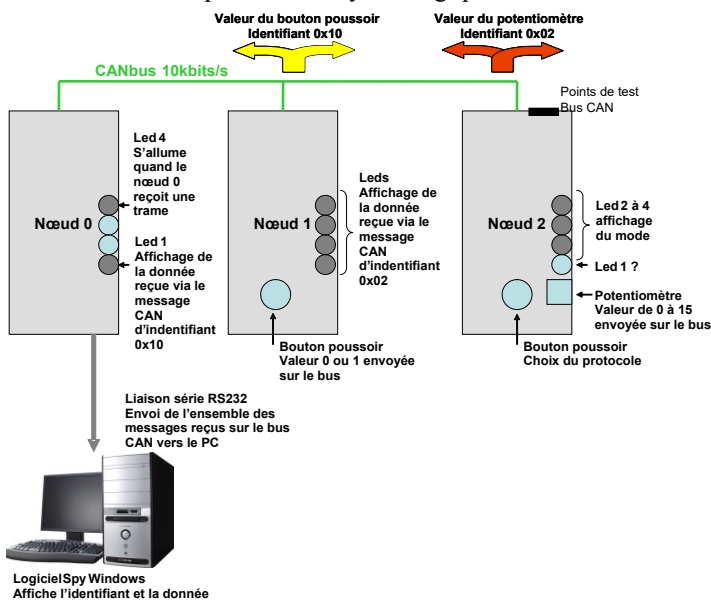
5.1. Manipulation Ethernet

Le TP consiste à configurer l'adresse IP de son PC, analyser des trames, comprendre le rôle d'un switch et d'un routeur, configurer le routeur, découvrir les protocoles ARP, DHCP, IP, TCP.



5.2. Manipulation CAN

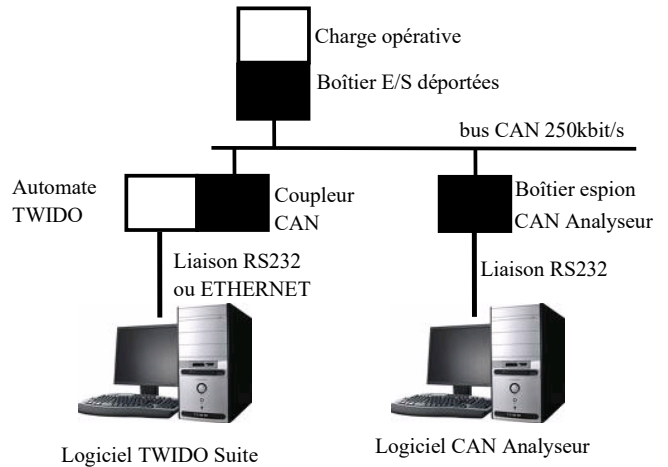
Chaque binôme de TP dispose d'un kit de test. Le kit est équipé de 3 cartes munies chacune d'un microcontrôleur. Les cartes communiquent via un bus CAN et sont munies d'interrupteurs et de LEDs. Différents protocoles de communication sont étudiés (les cartes sont fournies déjà programmées). Un logiciel « espion », sur bus série RS232 a été développé. Les étudiants analysent les trames à l'oscilloscope ou à l'analyseur logique.



5.3. Manipulation CAN OPEN

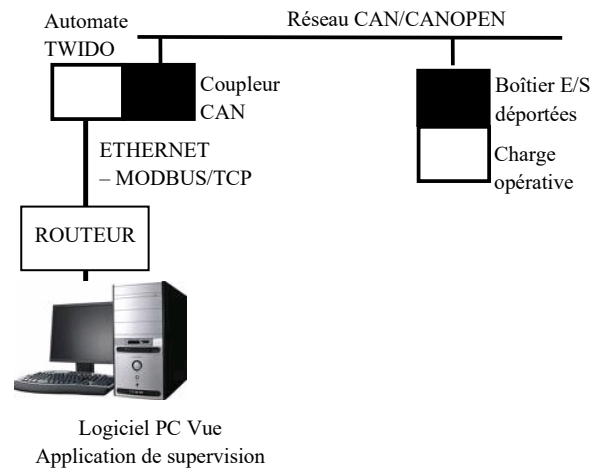
Chaque maquette est constituée d'un API, d'un coupleur CANOPEN, d'un boîtier d'entrées/sorties déportées communiquant avec l'API par un bus CANOPEN, d'un boîtier « espion » de trames connecté au bus série du PC. 3 interrupteurs et 3 LEDs matérialisent une charge opérative connectée au boîtier d'E/S déportées.

Le TP consiste à configurer le bus CANOPEN, analyser des trames, écrire une application très simple pour provoquer des échanges sur le bus, modifier la configuration du bus.



5.4. Manipulation supervision

Le TP consiste à lancer une application déjà écrite pour l'API TWIDO et à analyser les trames MODBUS avec WireShark. Si le PC est placé derrière un routeur, la reconfiguration du routeur est étudiée. Une autre séance de prise en main du logiciel PCVUE peut être proposée.



6. Conclusion :

CANopen est né en 93 et Modbus TCP hérite d'un protocole apparu en 1979, préhistoire de la communication informatique. L'enseignement de ces deux bus n'est-il pas un peu poussiéreux ? Comme l'explique les introductions aux parties 2 et 3, CANopen est très bien implanté comme bus de terrain et Modbus TCP encore le plus répandu des bus industriels sur Ethernet TCP/IP. Ces deux bus, comme leurs concurrents, répondent à 95% des besoins industriels, voir plus et sont maîtrisés par les fabricants et leurs clients. C'est pourquoi ils sont encore loin de la route du cimetière des bus en voie d'extinction, où les

y attendent FIP et VAN entre autres. De plus, ces bus éprouvés et documentés restent accessibles à des étudiants de DUT ou BTS et les outils de développement / capture accessibles au budget de leur établissement. Ils permettent d'aborder théoriquement et de mettre en œuvre les grands concepts des réseaux de terrain et supervision.

Le monde du contrôle/commande industriel est moins friand d'innovation que les fabricants de matériel ne le souhaiteraient. CANopen, DeviceNet, Profibus, Modbus TCP n'évoluent plus beaucoup mais font recette. Les équipes de développement réseau des fabricants déploient leur énergie désormais sur les bus de terrain basés sur Ethernet et sur les protocoles pour capteurs sans fil. Pour Ethernet en bus de terrain, les arguments avancés reposent sur l'unicité du bus de la supervision au capteur (une seule formation, un type de câblage), la facilité du diagnostic et de la configuration par page Web, le débit jusqu'à 1 Gbits/s, la possibilité d'utiliser la fibre optique ou le sans fil (dérivé du Wifi) et le temps de réponse du bus jusqu'à quelques dizaines de microsecondes pour les meilleurs. Plusieurs réseaux de terrain basés sur Ethernet sont apparus, plus ou moins temps réel, plus ou moins ouverts. Chaque fabricant défend celui qu'il participe à développer. Rockwell, Schneider Electric et Omron défendent Ethernet IP ; BeckHoff soutient Ethercat ; B&R met en avant le protocole OpenSource Ethernet PowerLink, Bosch Rexroth développe Sercos III et enfin GE Fanuc et Phoenix Contact accompagne Siemens dans le développement et la promotion de ProfiNet. A côté de leurs spécificités temps réels, ces bus font tous une place aux messages Ethernet TCP/IP standards pour faciliter le lien avec l'administration (logiciel MES et ERP). (cf article Ethernet Industriel, des stratégies en mouvement, Revue Jautomatise de novembre 2008)

L'autre catalogue qu'aiment sortir les commerciaux des fabricants d'équipements d'automatisme est celui des systèmes de communication sans fil. Basés sur des protocoles informatiques (WIFI, WiMax, Zigbee) ou des protocoles spécifiques (ISA 100, Wireless Hart), ces systèmes séduisants pour les installations étendues tardent à s'imposer. (cf article Les protocoles sans fil cherchent à s'imposer de la revue Mesures de septembre 2008)

Bus Ethernet « temps réel » ou bus sans fil, la bataille des protocoles fait rage, rythmée par les stratégies commerciales plus que par les performances techniques, tant ces bus performants répondent aux besoins actuels des industriels. Rendez-vous dans la revue 3EI numéro 160 pour faire le point.

Supervision des systèmes automatisés en visual basic et modbus/tcp : applications

Philippe POULET

Lycée du Rempart, Marseille
ppoulet@lgtrempart.fr

Jean-Marc BARRANCA

Lycée du Rempart, Marseille
jbarranc@lgtrempart.fr

Résumé : Cet article a pour but de présenter les possibilités de développement d'outils de supervision en utilisant le langage Visual Basic de Microsoft© et le protocole de communication Modbus/TCP. Un exemple de supervision déjà développée lors de thèmes de BTS Electrotechnique menés conjointement avec des étudiants de licence professionnelle Conduite et Supervision des Systèmes de Production Automatisés est présenté. Cette supervision porte sur une gestion d'éclairage d'une usine de production alimentaire, et a débouché sur la réalisation d'un système pédagogique reprenant le concept. Dans un deuxième temps, une gestion technique centralisée de l'éclairage du même type a été implantée au lycée du Rempart et a donné lieu au développement d'un système.

1. Introduction

Lors de la recherche d'un thème pour les étudiants de BTS Electrotechnique, le site Marseillais de la société Haribo nous a proposé de mener une étude sur la centralisation de l'éclairage de l'usine. Le cahier des charges comportait une partie classique sur la possibilité de contrôler à distance l'éclairage d'une zone, et une autre sur la partie maintenance des luminaires. En effet, cette société travaillant dans l'alimentaire doit utiliser des tubes fluorescents spéciaux « anti bris de verre », qui ont un coût unitaire nettement plus élevé qu'un tube standard. Le responsable maintenance souhaitait donc aussi pouvoir contrôler la durée de vie annoncée du tube par le fabricant, et il était donc nécessaire de comptabiliser la durée d'utilisation d'un tube dès son installation. Cette comptabilisation de la durée d'utilisation des luminaires permet aussi quand un tube est défectueux de savoir si les tubes voisins sont en fin de vie ou pas, et donc de les changer en même temps si la location d'une nacelle est nécessaire.

Aussi, dans un souci d'économie d'énergie, les zones pilotées devaient pouvoir fonctionner sur interrupteur crépusculaire.

Toutes les commandes d'éclairage de l'usine se faisaient localement à partir de télérupteurs, et la modification de l'installation existante devait être minime. Une éventuelle défaillance de la Gestion Technique Centralisée de l'Eclairage devait avoir comme seule conséquence le retour à un fonctionnement entièrement manuel.

2. Solution technique retenue

2.1 Solution matérielle

Pour avoir une gestion centralisée d'éclairage neutre sur l'installation existante, la solution retenue a été d'utiliser des modules d'entrées/sorties déportés dans

les armoires d'éclairage. En effet, une simple sortie en parallèle sur le bouton poussoir d'un télérupteur, avec une entrée récupérant l'état du télérupteur permet de le piloter à distance.

Sur un des modules, une entrée analogique sur laquelle est raccordé un capteur de luminosité permet de connaître le niveau de luminosité extérieur. Le fait qu'on mesure la luminosité fait qu'un seul capteur est nécessaire pour pouvoir faire fonctionner toutes les zones pilotées par interrupteur crépusculaire. Il suffit sur la supervision de paramétrer le seuil de déclenchement de la zone concernée.

2.2 Solution logicielle

L'usine possédant déjà un réseau Ethernet, le choix du Modbus/TCP comme protocole de communication nous est apparu comme la solution la plus évidente. Les spécifications de ce protocole sont libres et il est de ce fait facile à implémenter dans une supervision développée en interne.

En effet, nous avons dans un premier temps développé la supervision sur un progiciel de supervision en version de démonstration, mais au moment où l'entreprise a voulu acquérir la licence à la fin du projet, la commercialisation de ce progiciel a été stoppée. Il a donc fallu reprendre le développement de la supervision sur un autre logiciel.

Comme une grande partie de l'application reposait sur le module VBA du progiciel initial, nous avons donc décidé de développer avec les étudiants de licence professionnelle CSSA (Conduite et Supervision des Systèmes Automatisés) qui suivent une partie des cours au lycée du Rempart la supervision en Visual Basic, grâce à l'outil Visual Basic Express 2005 de Microsoft©.

Nous avons donc implémenté les différentes étapes de conception d'une supervision, à savoir :

1. déclarer la communication
2. créer les variables
3. créer les animations

Aussi, il s'agit ici d'une supervision améliorée, car la gestion du système se fait par le programme. La supervision fait donc aussi office d'automate.

3. Mise en œuvre

3.1 Les modules d'entrée/sortie

Ayant déjà travaillé avec des modules Phoenix Contact® de la gamme Inline, nous avons conservé ce choix. Toutefois, des modules Schneider Electric® de la gamme Advantys OTB auraient aussi fait l'affaire, et toute autre référence de modules d'E/S déportés communiquant en Modbus/TCP.

Les références des matériels nécessaires sont les suivantes :

Désignation	Référence	Prix (HT)
Tête de station Ethernet FL IL 24 BK-B-PAC	2862327	488 €
Module 2 entrées TOR IB IL 24 DI 2-PAC	2861221	44,95€
Module 1 sortie relais IB IL 24/230 DOR1/W-PAC	2861881	51,08€
Module 2 entrées analogiques 0-10V/4-20mA IB IL AI 2/SF-PAC	2861302	320,76€

Les tarifs donnés sont les tarifs catalogue, la remise que nous avons par notre fournisseur était de 45%.

Etant donné qu'un module permet de piloter jusqu'à 15 zones, le coût en matériel communicant est donc d'environ 81€ HT par télérupteur piloté. Dans le cas de 6 zones seulement pilotées par le module, le coût est d'environ 130€ HT.

A cela s'ajoute pour toute l'installation 1 module d'entrées analogiques et un capteur de luminosité Schneider Electric réf. MTN663596 à 133,40€ HT.

Vient ensuite s'ajouter le prix du câble qui dépend de l'installation, mais le surcoût de ce système de gestion d'éclairage est essentiellement lié aux modules d'E/S communicants. Le logiciel est gratuit donc n'engendre pas de surcoût.

Les schémas d'implantation sont donnés figure 1 et 2.

Les rampes de luminaires sont réparties sur trois phases pour l'équilibrage de la puissance. Pour les puissances importantes, le télérupteur ne commande pas directement les luminaires mais commande un contacteur de puissance. Cette configuration a été adoptée par le service maintenance de l'usine car en commande directe par le télérupteur, la durée de vie

du dit télérupteur s'avérait moins importante que prévue (sûrement dû au caractère inductif de la charge).

On retrouve donc une sortie du module en parallèle avec les boutons poussoirs de commande des télérupteurs et un contact télérupteur sur une entrée du module.

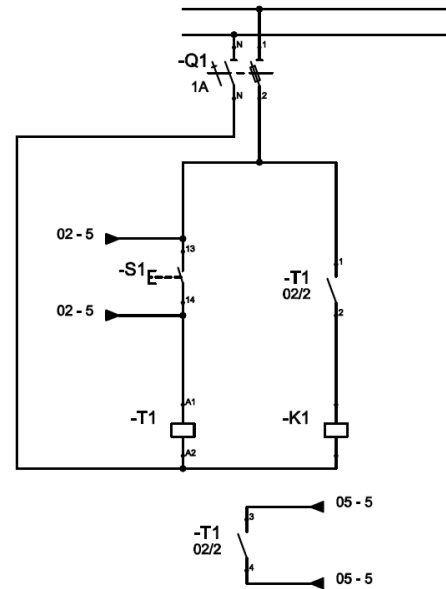


Figure 1: commande du télérupteur

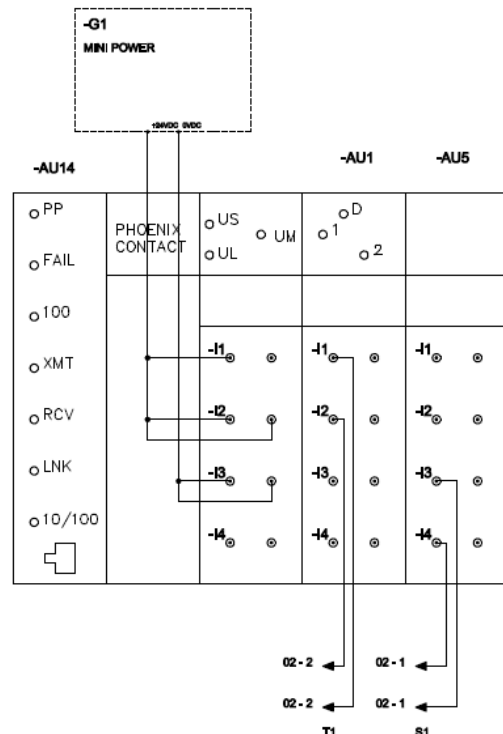


Figure 2: raccordement au module

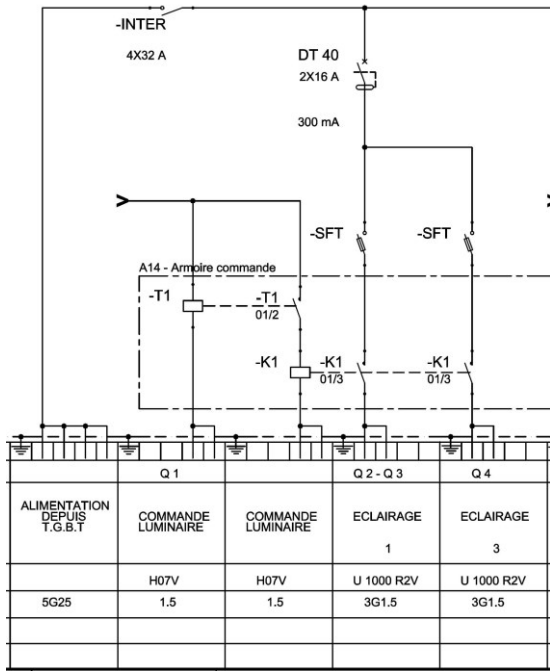


Figure 3: extrait du schéma unifilaire

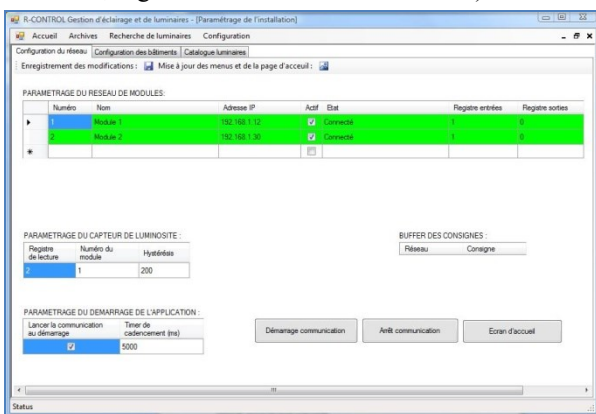
Pour l'installation qui a été faite au lycée, l'architecture matérielle est identique.

2.2 Solution logique

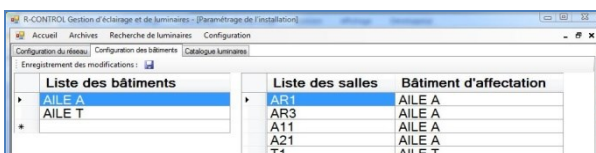
Le logiciel a été développé en Visual Basic par les étudiants de la licence professionnelle Conduite et Supervision des Systèmes Automatisés de l'université d'Aix-Marseille Campus de Saint-Jérôme. Une partie des cours de cette licence est donnée au lycée du Rempart et c'est dans ce cadre là qu'ils ont été associés au projet.

Le résultat est un progiciel R-CONTROL entièrement paramétrable qui possède les fonctionnalités suivantes :

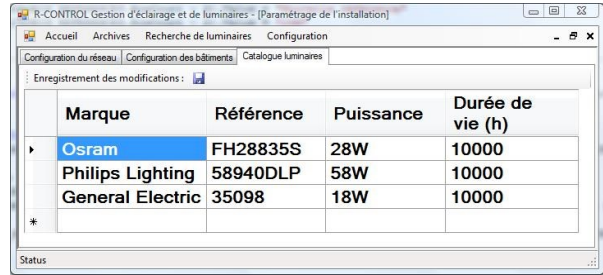
- déclaration des modules et paramétrage (adresse IP, registres des entrées et des sorties) :



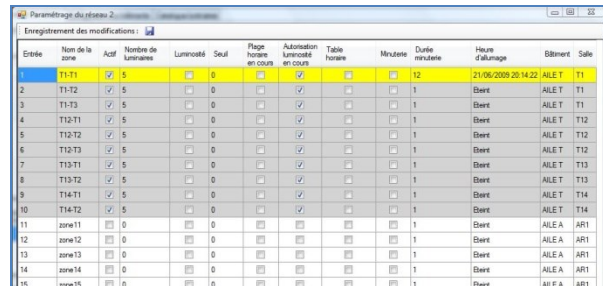
- saisie de la configuration des bâtiments et salles :



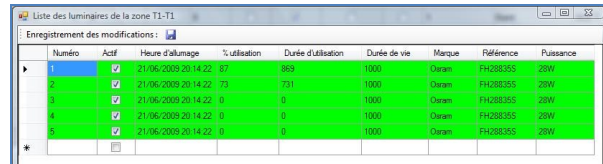
- saisie du catalogue de luminaires :



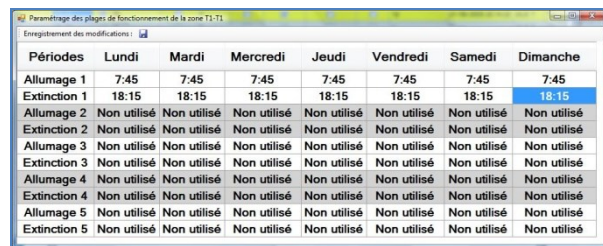
- paramétrage des entrées des modules :



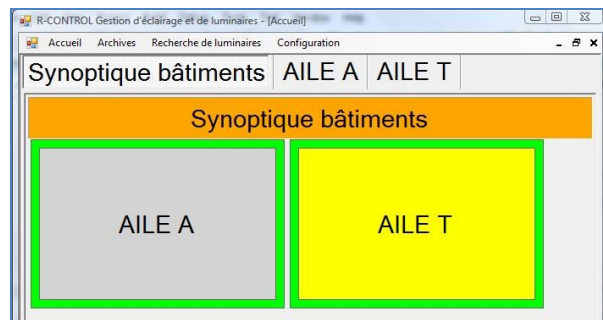
- paramétrage des luminaires d'une zone :



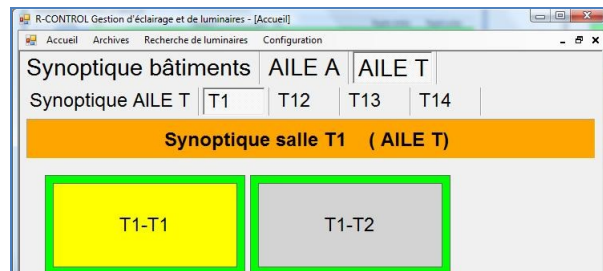
- paramétrage de la table horaire d'une zone :



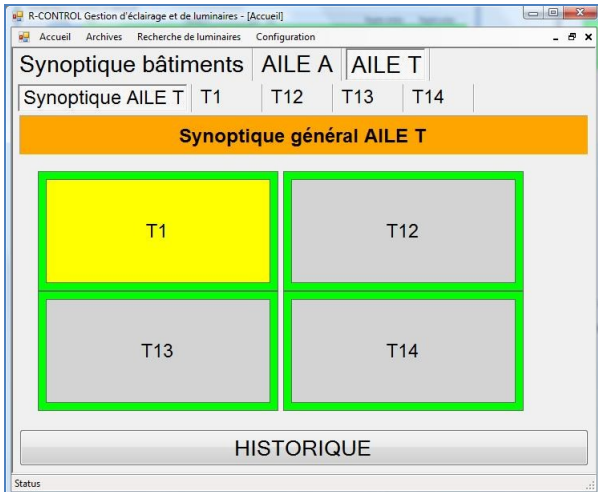
- synoptique bâtiments :



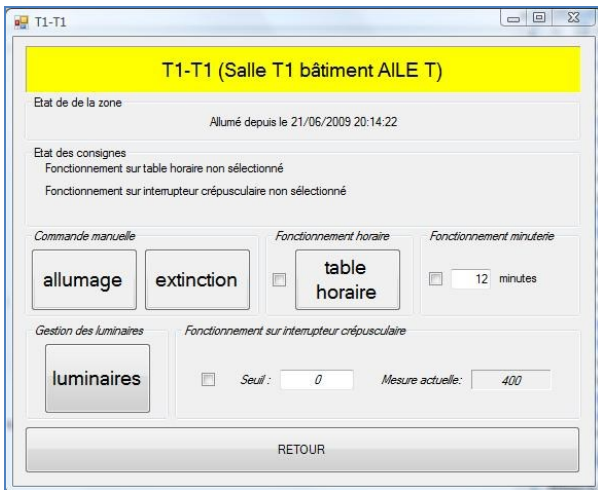
- synoptique zones :



- synoptique salles :



- synoptique commande d'une zone :



- synoptique historique bâtiment :

Date	Bâtiment	Salle	Zone	Événement
21/06/2009 20:54:16	AILE A	A21	A21-T2	Extinction
21/06/2009 20:54:11	AILE A	A21	A21-T1	Extinction
21/06/2009 20:54:02	AILE A	A11	A11-T1	Extinction
21/06/2009 20:53:28	AILE A	AR3	AR2-T1	Extinction
21/06/2009 20:53:22	AILE A	AR3	AR3-T1	Extinction
21/06/2009 20:53:15	AILE A	AR1	AR1-T3	Extinction
21/06/2009 20:53:07	AILE A	AR1	AR1-T2	Extinction
21/06/2009 20:52:56	AILE A	A21	A21-T1	Allumage
21/06/2009 20:52:51	AILE A	A21	A21-T2	Allumage
21/06/2009 20:52:45	AILE A	A11	A11-T1	Allumage

- synoptique de recherche d'état de luminaires :

Bâtiment	Salle	Zone	Numéro	%	Marque	Référence
AILE A	A11	A11-T1	1	95	Osram	FH28835S
AILE A	A11	A11-T1	2	81	Osram	FH28835S
AILE A	A11	A11-T2	1	87	Osram	FH28835S
AILE A	A11	A11-T2	2	73	Osram	FH28835S
AILE A	A11	A11-T3	2	73	Osram	FH28835S
AILE A	A11	A11-T3	1	87	Osram	FH28835S
AILE A	AR1	AR1-T1	1	87	Osram	FH28835S
AILE A	AR1	AR1-T1	2	73	Osram	FH28835S
AILE A	AR1	AR1-T2	1	92	Osram	FH28835S

Concernant l'installation du lycée, le logiciel est installé sur un PC à écran tactile de faible consommation (25W). Le concierge bénéficie de cette interface tactile, ce qui facilite l'exploitation de la supervision.

Concernant le fonctionnement des zones, grâce au synoptique « commande », on peut sélectionner un fonctionnement sur table horaire, minuterie ou interrupteur crépusculaire.

Un ordre d'allumage est donné lorsqu'on rentre dans une plage horaire active (front montant plage active), et un ordre d'extinction lorsque l'on en sort. Entre les deux, la main est redonnée à l'utilisateur de la zone. S'il décide d'éteindre de lui-même après un allumage automatique, la zone restera éteinte jusqu'au prochain ordre d'allumage. Il en est de même lorsque l'utilisateur rallume après une extinction automatique, elle ne s'éteindra automatiquement que lorsqu'on sort d'une plage d'allumage (front descendant plage active).

Pour le fonctionnement minuterie, il est actif s'il est sélectionné et si on est en dehors d'une plage horaire active. De ce fait, si on sélectionne plage horaire active et minuterie, la zone fonctionne en minuterie en dehors des plages horaires actives.

Pour le fonctionnement en interrupteur crépusculaire, s'il est sélectionné, la zone est éteinte dès que la mesure dépasse la valeur de seuil, et est rallumée lorsque la mesure repasse sous la valeur de seuil moins l'hystérésis, à condition qu'on soit dans une plage horaire active. Si ce n'est pas le cas, il n'y a aucune raison de rallumer.

Le temps d'utilisation de chaque luminaire est comptabilisé, et son pourcentage d'usure calculé à chaque extinction.

Lorsque le seuil de 90% est dépassé sur un luminaire, la bordure du rectangle de zone dans le synoptique zone passe de la couleur verte à la couleur orange. Du coup, la bordure du rectangle correspondant à la salle d'appartenance de la zone passe également en orange, de même que la bordure du rectangle correspondant au bâtiment dans le synoptique bâtiment.

Lorsqu'un luminaire dépasse les 100%, la couleur des bordures correspondantes passe au rouge.

Le concierge ainsi que le personnel de maintenance a donc un aperçu très visuel de l'état d'usure des luminaires dans chaque bâtiment, salle et zone.

Un historique des allumages et extinctions est conservé pour chaque bâtiment, et archivé pour une consultation ultérieure.

Il est aussi possible de rechercher des luminaires en fonction de leur zone d'affectation, bâtiment d'affectation et salle d'affectation, mais surtout en fonction de leur taux d'utilisation.

4. Exploitation pédagogique du projet

4.1 Système dérivé

Nous avons mis en place dans le laboratoire d'essais de système une maquette pilotant une zone contenant deux points lumineux. Le raccordement du module a été effectué comme indiqué sur les figures 1, 2 et 3. Le module est raccordé au réseau Ethernet du lycée.

4.2 TP n°1 : choix du matériel et conception des schémas

Ce TP d'une durée de 4 heures reprend la partie conception. Le cahier des charges est fourni au binôme d'étudiants, ainsi qu'un fichier de schémas sous Trace Elec Pro© servant de base de départ.

Les étudiants ont à leur disposition les catalogues constructeurs et l'accès à leurs sites internet.

Ils doivent donc choisir le matériel nécessaire, et chiffrer cette partie.

Ensuite, ils doivent compléter les schémas fournis.

Les compétences et tâches professionnelles travaillées lors de ce TP sont donc :

- C01 : Analyser un dossier
- C02 : Choisir une solution technique
- C08 : Concevoir une solution technique
- C10 : Réaliser les représentations graphiques nécessaires
- T1.1 : Analyser les cahiers des charges et les appels d'offre
- T1.3 : Concevoir des solutions techniques et des processus de fabrication dans le respect du cahier des charges et des contraintes imposées par le procédé
- T1.4 : Réaliser les dossiers techniques de fabrication et d'exécution de chantier

Les savoirs associés abordés sont :

3 Les équipements communicants :

3.1 L'acquisition de l'information :

3.1.2 Les appareils communicants dédiés :

4 La communication technique appliquée aux infrastructures, à l'habitat, aux bâtiments industriels et tertiaires :

4.1 Le pilotage des équipements liés au confort :

4.1.1 Étude et choix du matériel adapté pour une installation de gestion technique centralisée dans l'habitat, les locaux recevant du public et les infrastructures en prenant en compte les contraintes climatiques, d'éclairage, de coûts et de confort, avec ou sans logiciel adapté ;

4.1.2 Mise en œuvre d'une installation de gestion technique centralisée dans l'habitat, les locaux recevant du public et les infrastructures ;

4.1.4 Représentations graphiques normalisées utilisées dans le domaine de la climatisation et de l'éclairage ;

4.3 TP n°2 : Mise en œuvre de la communication – Protocole Modbus/TCP

Ce TP d'une durée de 4 heures porte sur la partie communication. Dans un premier temps les étudiants doivent choisir et assigner une adresse IP au module de communication en utilisant le logiciel adapté. Une fois cette partie réalisée, ils doivent, à partir d'un logiciel spécialement développé pour ce TP, concevoir les trames Modbus/TCP qui permettent d'aller chercher les informations demandées dans le module et d'agir sur les sorties.

La compréhension des notions de bit, octet et mot est indispensable pour la réussite de ce TP, c'en est d'ailleurs la principale difficulté pour les étudiants. Aussi, les documentations constructeur sont celles d'origine en anglais. Elles ne sont volontairement pas traduites car cela correspond à la réalité du terrain, et certains étudiants commencent à comprendre l'utilité de l'apprentissage de l'anglais à ce moment là. Ils sont de toute façon prévenus dès la rentrée scolaire qu'ils auront à exploiter des ressources en anglais et nous travaillons en ce sens avec le professeur concerné.

Les compétences et tâches professionnelles travaillées lors de ce TP sont donc :

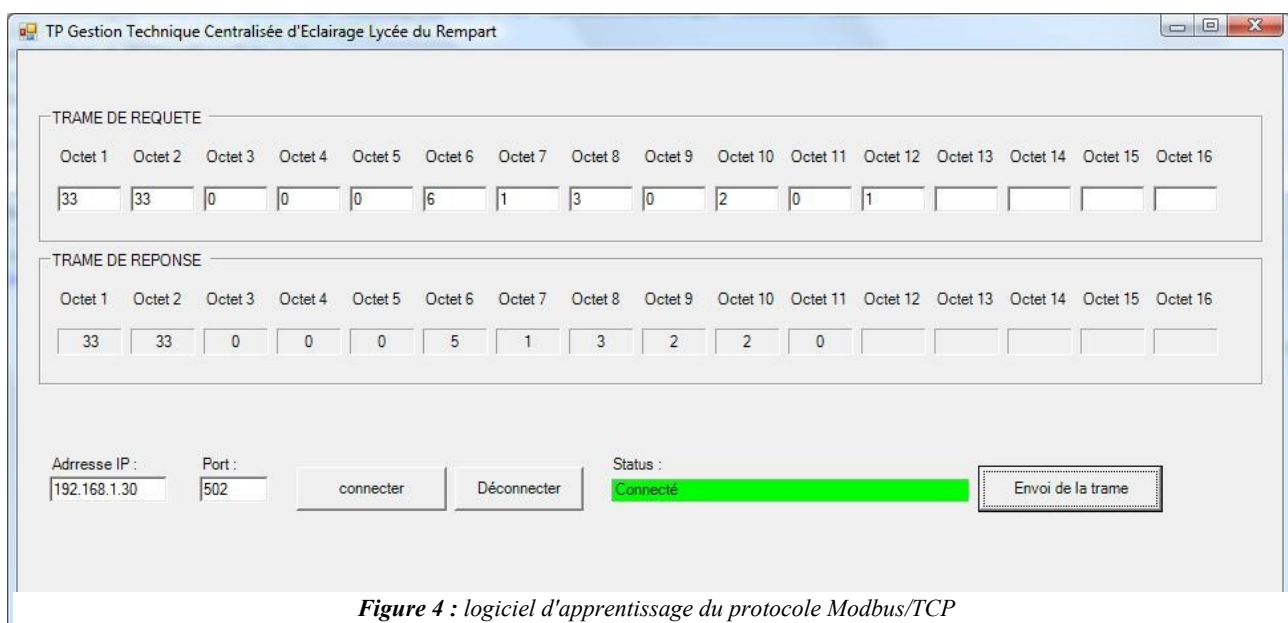


Figure 4 : logiciel d'apprentissage du protocole Modbus/TCP

3.1.2.2 Entrées/sorties et modules distribués.

- C01 : Analyser un dossier

- C03 : Analyser une solution technique
- C04 : Rédiger un document de synthèse
- C06 : Respecter une procédure
- C14 : Analyser les causes de dysfonctionnement
- C18 : Interpréter des indicateurs, des résultats de mesure et d'essais
- T1.3 : Concevoir des solutions techniques et des processus de fabrication dans le respect du cahier des charges et des contraintes imposées par le procédé
- T5.4 : Effectuer la mise en service dans le respect des règles de sécurité

Les savoirs associés abordés sont :

3 Les équipements communicants :

3.1 L'acquisition de l'information :

3.1.2 Les appareils communicants dédiés :

3.1.2.2 Entrées/sorties et modules distribués.

3.4 Le transport et la gestion de l'information :

3.4.1 Les concepts de base des réseaux industriels

3.4.1.1 Connaissances de base en transmission de données (câblage, commutateurs, appareillages, adressage, protocole) ;

4.4 TP n°3 : Programmation en Visual Basic

Ce TP d'une durée de 6 heures porte sur la partie programmation du logiciel spécialement développé pour le TP précédent.

Les étudiants disposent de l'atelier logiciel Visual Studio de Microsoft et du code source du logiciel. Le travail demandé aux étudiants consiste à traduire le code largement commenté sous forme d'organigramme, afin qu'ils puissent appréhender les notions essentielles d'un langage de programmation pour PC. Pour les étudiants les plus à l'aise, une modification du programme pour cadencer l'envoi de

Les compétences et tâches professionnelles travaillées lors de ce TP sont donc :

- C03 : Analyser une solution technique
- C06 : Respecter une procédure
- C07 : Argumenter sur la solution technique retenue
- T2.4 : Proposer des améliorations de procédé et d'organisation
- T2.5 : Réaliser un ouvrage, un équipement ou un produit en suivant un dossier de fabrication ou d'exécution de chantier

Les savoirs associés abordés sont :

3 Les équipements communicants :

3.2 Le traitement de l'information :

3.2.1 Équipements programmables industriels (API - PC...);

3.2.3 Langages de programmation utilisés dans les PC industriels ;

3.2.4 Outils de description de fonctionnement normalisés du type: Grafset – Organigramme – Langage à contact – Langage littéral ;

3.2.5 Ateliers logiciels.

4.5 Exploitation en chantier

La mise en service de la gestion technique centralisée se faisant par étapes, elle représente un contexte idéal d'évaluation pour l'épreuve de chantier. En effet, il est nécessaire de tirer des câbles entre les modules et les télérupteurs isolés, et de modifier les commandes d'éclairage des salles que l'on souhaite intégrer pour les passer en télérupteur si elles étaient en va-et-vient par exemple.

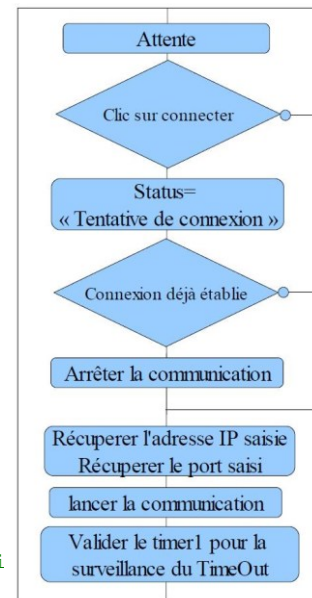
Un grand nombre de contraintes correspondant à ce que l'on attend en épreuve de chantier apparaît : passage de câbles en hauteur, travail dans des lieux de

EXEMPLE DE CODE A TRADUIRE SOUS FORME DE LOGIGRAMME

```

*****
'événement déclenché sur clic sur le bouton connecter
*****
Private Sub connecter_Click(ByVal sender As System.Object, _
    ByVal e As System.EventArgs) Handles connecter.Click
    'on passe le texte de la textbox "status" à "tentative
    'de connexion" et sa couleur de fond en orange pour signaler
    'que la demande a bien été prise en compte
    Me.status.Text = "Tentative de connexion"
    Me.status.BackColor = Color.Orange
    'si l'état du socket de communication est différent de "closed"
    'on le ferme par précaution
    If (Winsock1.CtlState <> MSWinsockLib.StateConstants.sckClosed) Then
        Winsock1.Close()
    End If
    'on assigne comme adresse IP cible du socket de communication
    'l'adresse saisie dans le controle textbox "adresse_ip"
    Winsock1.RemoteHost = adresse_ip.Text
    Winsock1.RemotePort = port.Text
    'on demande la communication
    Winsock1.Connect()
    'on active le timer1 dont le rôle est de surveiller la continuité de
    'la communication entre le PC et le module une fois qu'elle est établi
    Timer1.Enabled = True
End Sub

```



trames est demandée. Cependant, pour atteindre le niveau taxonomique visé par le référentiel sur les langages de programmation, la première partie est largement suffisante.

passage, consignations pouvant gêner l'exploitation, etc.

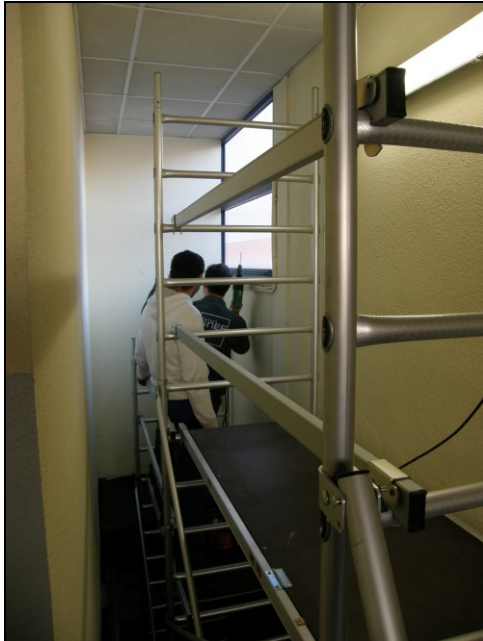


Figure 5 : Mise en place d'un échafaudage dans une cage d'escalier lors d'un chantier de tirage de câbles au lycée

5. Autres possibilités de supervision

Une autre supervision développée en Visual Basic a été mise en place lors d'un thème avec la société SETNAG (Société d'Etudes Techniques Nouvelles d'Analyse de Gaz, www.setnag.com). Cette supervision portait sur une unité de fabrication de jauges à oxygène composée de trois fours de 1500W pouvant monter jusqu'à une température de 1300°C. Il y a possibilité pour chaque four de créer des recettes et de suivre en temps réel la production, et l'émission d'un compte rendu en fin de production. Une gestion des alarmes est aussi assurée avec un archivage de chaque événement.



Figure 6 : Réalisation d'une unité de cuisson de jauges à oxygène dans le cadre d'un thème de BTS

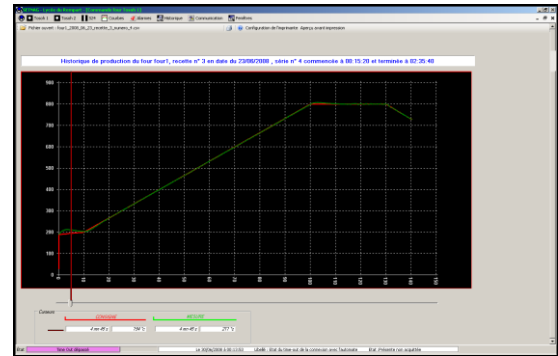


Figure 7 : synoptique de suivi de production

6. Conclusion et perspectives

Le développement de supervisions en Visual Basic peut paraître au premier abord hors référentiel concernant le BTS Electrotechnique. Cependant, l'environnement de développement Visual Studio offre des outils permettant un développement rapide et facile de synoptiques. La difficulté se situe au niveau de la communication, mais la mise à disposition d'applications déjà développées facilite cette partie. Une fois que les méthodes et classes permettant de mettre en œuvre la communication Modbus/TCP sont rodées, le travail de développement rejoint la démarche à suivre lors de la mise en œuvre d'un progiciel de supervision.

Cela permet de développer à moindre coût une supervision toute aussi performante, et ce d'autant plus que les supervisions que nous sommes amenés à développer lors des thèmes gèrent un nombre limité de variables et de synoptiques. Le fait de pouvoir proposer une supervision n'engendrant pas de surcoût lors des négociations de thèmes avec les industriels est un plus indéniable dans leur prise de décision.

Cela ne nous empêche évidemment pas de travailler avec des progiciels de supervision du marché au cours de la formation, c'est d'ailleurs par là qu'il faut commencer pour faire passer le concept.

Les différents logiciels développés et leurs sources sont à disposition sur simple demande, dans le cadre d'une licence GNU-GPL. Il en est de même des TP

7. Remerciements

Nous tenons à remercier toutes les personnes impliquées à un moment donné de près ou de loin dans les différentes réalisations ayant conduit à la rédaction de cet article : M. Christian DAO VAN (HARIBO), M. Michel GANTES et Pierre SCRIVA (SETNAG) et les étudiants M. Nicolas GAMBOTTI, M. Rémy GASTAUD, M. Thomas JEANNE, M. Amada AHMED, M. Patrice MOURRE, M. Florian OLIVER, M. Jérémy SOLER, M. Alexandre DUBUT, M. Rémi LUNARDI, M. Hachem MOSBAH, M. Rudy TOMEI, M. Julien CIMOLAI, M. Abdelkrim GOMRI, M. Nicolas MONTAQ et M. Dimitri VERDET.

Réseaux embarqués pour l'automobile, application aux systèmes de commande électrique

Patrick LESERF

Laboratoire Systèmes Embarqués

Ecole Supérieure des Techniques Aéronautiques et de Construction Automobile (ESTACA)

Rue Georges Charpak

53061 Laval Cedex 9

E-mail : patrick.leserf@estaca.fr

Tél. : 02 43 59 47 00

Résumé : Cet article présente les différents types de réseaux embarqués automobile disponibles actuellement. Leurs caractéristiques et leurs applications sont présentées. Dans un deuxième temps l'utilisation du réseau FlexRay pour une direction électrique « Steer by wire » est développée. Les aspects sûreté de fonctionnement et déterminisme temporel du réseau FlexRay pour cette application sont actuellement étudiés au laboratoire Systèmes embarqués de l'ESTACA, autour d'une plateforme de test.

1. Introduction

Les bus et réseaux embarqués permettant de relier les calculateurs automobiles entre eux étaient inexistant dans les systèmes embarqués il y a 30 ans. Ils sont devenus un élément essentiel et incontournable des véhicules actuels. Après avoir présenté l'origine de ces réseaux, nous présenterons les caractéristiques de trois réseaux embarqués utilisés actuellement : les réseaux LIN, CAN et FlexRay. Puis l'application du FlexRay à une commande électrique sera présentée. Nous concluons sur les perspectives d'évolution du domaine dans les prochaines années

2. Origine des réseaux embarqués automobiles

L'architecture électronique du véhicule actuel se compose de calculateurs (ECUs), de capteurs, d'actionneurs et de bus de communication sur lesquels transitent des signaux (pression, température). On compte aujourd'hui jusqu'à 70 ECUs sur un véhicule haut de gamme pour plus de 2500 signaux échangés. Les réseaux embarqués ont émergé dans les années 1980, alors qu'auparavant chaque ECU était indépendant et réalisait une fonction particulière (ABS, climatisation). Les fonctions évoluant, il est devenu nécessaire d'échanger de plus en plus d'informations entre ECUs et par conséquent de développer un moyen de communication tout en limitant la masse des câbles de connexion. Le bus CAN (Controller Area Network) était né (brevet BOSCH en 1983 en mise en série en 1992 puis 1996 chez un constructeur français)

3. Contraintes applicables aux réseaux embarqués

A partir de ce premier réseau embarqué, de nouvelles contraintes sont apparues induisant des évolutions d'architectures :

1. Pour la réalisation d'une même fonction, de plus en plus d'ECUs collaborent en fournissant l'information nécessaire
2. Les débits d'information (en bit par seconde) nécessaires sont différents d'une zone à l'autre du véhicule et par fonction :
 - a. Moins de 20 kbit/s dans une portière pour le lève vitre ou le rétroviseur (réseau carrosserie)
 - b. 125 kbit/s dans l'habitacle pour l'affichage et les fonctions de confort (habitacle)
 - c. 500 kbit/s pour le contrôle moteur et le châssis
 - d. Plusieurs Mbit/s pour une suspension pilotée, une direction entièrement électrique, ou le multimédia dans l'habitacle
3. Certaines applications peuvent tolérer les perturbations électromagnétiques, d'autre non. En conséquence le réseau doit intégrer des mécanismes de protections au niveau physique (blindage, paire torsadée) et logique (contrôle des erreurs par CRC)
4. Respect des contraintes temps réel. Pour un ABS : l'information de glissement doit être transmise en moins de quelques ms. Pour les futures fonctions « X by wire » ou tout électrique, le temps de transmission des signaux devra être garanti.
5. Le coût des différents réseaux : bas coût pour les capteurs/actionneurs, coût élevé pour la fibre optique.

4. Architecture des réseaux

Pour répondre à ces contraintes, les architectures actuelles se composent de plusieurs réseaux interconnectés ensemble par des passerelles. En fonction de la gamme de véhicule, on va trouver de un à cinq réseaux correspondant à des zones différentes du véhicule. Pour un véhicule de moyenne gamme, on trouvera par exemple :

Un réseau carrosserie à bas débit reliant les capteurs/actionneurs intégrés dans les portières par exemple.

Un réseau confort à moyen débit reliant les nœuds de l'habitacle (tableau de bord, auto-radio)

Un réseau à haut débit sous-capot de contrôle moteur et châssis intégrant les éléments de dynamique du véhicule

Un réseau de diagnostic et de calibrage du véhicule, à haut débit également.

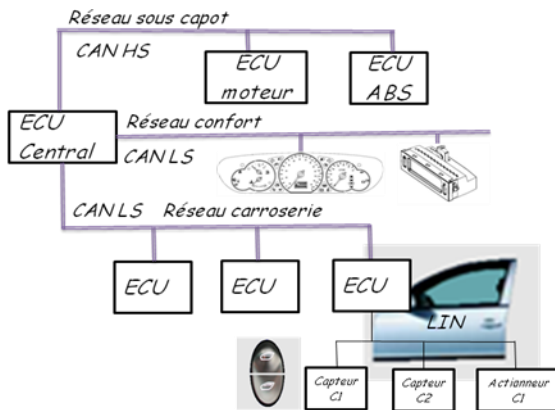


Figure 1 : Exemple architecture de réseaux embarqués

Il en résulte une première segmentation des réseaux, avec la mise en œuvre de réseau LIN/CAN LS pour les débits bas et moyens (> 125 kbit/s), CAN HS pour le haut débit jusqu'à 1 Mbit/s. Enfin, pour les applications à haut débit (> 10 Mbit/s) ou nécessitant une forte synchronisation, on retrouve le bus FlexRay.

5. Sous réseaux bas débit de capteurs et d'actionneurs

Lorsque les débits nécessaires ne dépassent 20kb/s, le bus LIN (Local Interconnect Network) constitue une solution intéressante pour relier un réseau de capteurs et d'actionneurs à un ECU, pour réaliser un lève-vitre ou commander un siège dans l'habitacle.

Spécifié par un consortium de l'automobile en 2000, le réseau LIN utilise un seul fil comme média de communication. Les échanges de données sont cadencés par un « maître » qui impose son horloge à plusieurs « esclaves » dans le cadre d'un cycle de communication. Les échanges de données sont contrôlés par le maître suivant un scénario défini à l'avance dans des tables :

1. Le maître démarre une transmission (il impose son horloge), et demande une information par son identifiant

2. Un esclave diffuse l'information qui est demandée (un seul producteur) aux autres nœuds.

On trouve généralement plusieurs tables, le maître pouvant décider de changer de table en fonction des échanges. Ainsi dans le cas typique d'une application de commande d'actionneur à partir de capteur, on pourra trouver :

1. Une première table de scrutation, dans laquelle le maître interroge chaque capteur
2. Une seconde table de mise à jour des actionneurs, le maître envoyant la nouvelle consigne

Le basculement d'une table à l'autre s'effectue en fin de cycle, lorsqu'une donnée d'un capteur a suffisamment évolué. A l'intérieur de chaque cycle un intervalle de temps est alloué à chaque nœud (capteur ou actionneur) permettant d'envoyer une trame comprenant entre un et huit octets de données utiles. Le nœud « maître » dispose également d'une tâche esclave lui permettant d'envoyer une donnée aux ECU esclaves.

6. Sous réseaux moyen débit carrosserie/habitacle

Dans cette zone du véhicule on retrouve principalement le réseau « CAN LS » (Low Speed) avec un débit de 125 kbit/s. Contrairement au réseau LIN contrôlé par le temps, le réseau CAN est contrôlé par les événements, chaque nœud pouvant être maître et initier une transmission. Par en contre en raison de la possibilité d'avoir des débuts de transmission simultanés, il existe un temps de latence qui dépend de la charge du réseau, de la longueur du réseau et de la dérive des horloges de chaque nœud. En cas de transmission simultanée, l'arbitrage se fait au niveau du bus lui-même par un mécanisme de priorité intervenant à chaque transmission d'un bit. Un nœud émetteur échantillonne le bit qu'il vient de positionner, au point d'échantillonnage (pendant le temps bit). Si la valeur lue est différente, l'arbitrage est perdu par le nœud. Celui-ci attend alors la fin de la transmission en cours pour émettre à nouveau la trame d'information.

Si le temps de latence n'est pas connu, on peut cependant calculer son maximum, pour une architecture donnée et pour une transmission périodique.

Avec pour hypothèse une architecture de 8 calculateurs sur le même réseau, CAN HS à 250 kbit/s, 8 octets de données par trame, on obtient :

1. Un temps bit de 4 μ s
2. Une trame de 131 bits au maximum, transmise sans collision en 524 μ s

Avec le modèle de transmission périodique suivant :

	20ms	40ms	80ms
ECU contrôle moteur	2 trames	2 trames	1 trame
ABS	1 trame	1 trame	
Tableau de bord			4 trames
Suspension		2 trames	2 trames
Direction assistée		1 trame	1 trame
Angle volant	1 trame		

On obtient :

ID trame	Ttrame (µs)	Tcycle(ms)	Tretard(µs)	% de retard sur le cycle
1	524	20	524	3%
2	524	20	1 048	5%
3	524	20	1 572	8%
4	524	20	2 096	10%
5	524	40	2 620	7%
6	524	40	3 144	8%
...	524			
17	524	80	8 908	11%
18	524	80	9 432	12%

Soit dans le pire cas jusqu'à 9 ms de retard soit 12% du temps de cycle pour la trame concernée. En pratique on limite le nombre de nœuds sur la même branche en créant des sous-réseaux lorsque le temps de latence maximal doit être réduit. Cela produit une architecture plus complexe, avec des passerelles entre sous-réseaux.

7. Sous réseaux haut débit

Les besoins en réseau de plus haut débit pour les éléments sous capot sont actuellement assurés par le réseau CAN, mais dont la limite est fixée à 1 Mbit/s pour le débit brut. Pour des débits plus importants, le réseau FlexRay offre une alternative. Le réseau FlexRay est issu d'un consortium créé en 2000 par BMW, Daimler Chrysler et les fondateurs Philips et Motorola. Le réseau est capable de gérer deux canaux physiques de transmission, avec un débit jusqu'à 10 Mbit/s sur chaque canal. Les deux canaux peuvent être utilisés en redondance d'information (pour une application critique) ou en mode complémentaire pour doubler la bande passante disponible. Comme pour le réseau LIN, l'accès est contrôlé par le temps. Dans le réseau LIN, seul l'horloge de l'ECU maître est nécessaire à la synchronisation de la transmission. Dans le réseau FlexRay, chaque ECU conserve sa propre horloge, alors qu'une horloge globale au réseau est construite par un algorithme de synchronisation. Le calcul de cette horloge écarte les ECUs présentant une dérive trop importante, permettant ainsi une certaine tolérance aux fautes. A partir de cette horloge globale, un cycle de communication déterminé à l'avance se met en place, chaque ECU disposant d'intervalles de temps dans ce cycle pour transmettre l'information. Durant le cycle, chaque nœud compare son horloge à l'horloge globale, et applique une correction en fin de cycle (Network Idle Time).

8. Application du FlexRay aux commandes électriques

Le bus FlexRay trouve sa principale intégration dans les systèmes de commandes électrique, où les liaisons mécaniques sont remplacées par des ensembles de capteurs/actionneurs/ECUs répartis dans le véhicule. Il en résulte un gain de masse (environ 13Kg pour une colonne de direction) ainsi qu'une plus grande facilité d'intégration de nouvelles fonctions, comme la direction à assistance variable ou l'avertissement du conducteur en cas de situation dangereuse. Ces systèmes nécessitent

un débit d'information élevé, compris entre 1 et 10 Mbit/s. Une autre exigence concerne la tolérance aux fautes. Ces systèmes doivent continuer à fonctionner, éventuellement dans un mode dégradé, en présence d'un défaut sur un ECU, sur un capteur ou un actionneur, ainsi qu'après une rupture d'un canal de communication. Concernant ce dernier point, le réseau FlexRay intègre deux canaux de transmission qui seront utilisés en redondance dans ce type d'application.

En prenant le cas d'une direction électrique, l'architecture suivante offre un premier niveau de tolérance aux fautes :

1. deux ECU volants fournissent un retour de force au conducteur par l'intermédiaire de deux actionneurs (MCC1 et MCC2). En cas de défaillance d'un ECU ou d'un actionneur, l'autre prend le relais.
2. Les capteurs de couple et d'angle volant sont triplés
3. La même architecture est utilisée pour agir sur la crémaillère de direction (Rack)
4. Les quatre ECUs échangent leurs informations notamment les angles (a1, a2, a3), couples (C1, C2, Cm) leur état interne par l'intermédiaire des deux canaux d'un réseau FlexRay.

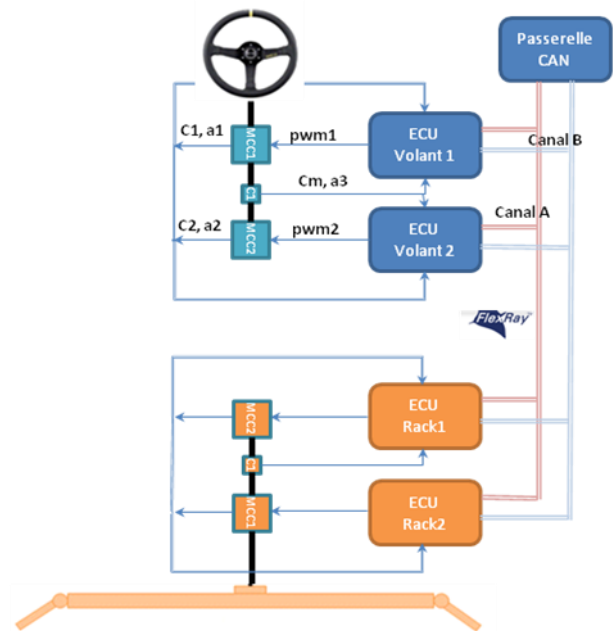


Figure 2 : Architecture direction assistée électrique

Communication inter-ECU :

La communication FlexRay se décompose en une partie statique, une partie dynamique ainsi qu'un temps de resynchronisation. Ce dernier est utilisé par chaque ECU pour se resynchroniser sur l'horloge globale, calculée à partir des données d'ECUs choisis à l'avance.

Dans le segment statique, chaque nœud dispose d'un temps d'émission (intervalles ou slots) définis à l'avance. Dans le segment dynamique, des slots sont prévus mais pour une transmission par priorité, limitée en temps et en bande passe, similaire au réseau CAN.

La part statique/dynamique est définie à l'avance mais « Flexible » en fonction de l'application. Dans le cas de la direction électrique, le transfert de la plupart des informations doit être accompli en moins de 5 ms. On utilise donc principalement la partie statique pour transmettre les signaux.

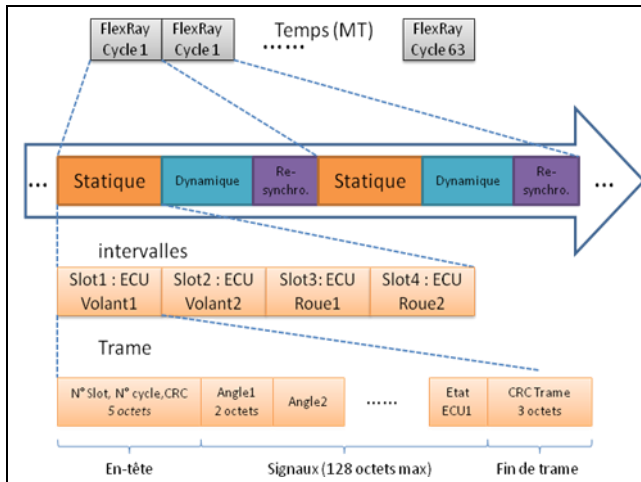


Figure 3 : Transmission de l'information FlexRay sur un canal

9. Validation expérimentale

La partie électronique est constituée de 4 cartes d'évaluations NEC PHO3 utilisant le microcontrôleur V850, deux canaux FlexRay et CAN ainsi que des entrées sorties dédiées au contrôle de machines électriques. La partie logicielle des microcontrôleurs est réalisée avec les outils Vector et Geensys, avec le standard de conception logicielle AUTOSAR.

La partie électromécanique est constituée de deux machines électriques à courant continu, de codeurs incrémentaux et potentiométriques pour les mesures d'angle. La mesure des couples est réalisée par deux mesures de courants ainsi que par un capteur de couplemètre. Chacune des deux machines à courant continu est commandées par quatre signaux PWM à haute précision incluant des temps morts, générés par les microcontrôleurs. Les stimuli externes au système comme la vitesse véhicule sont produits par un banc « Hardware In the Loop » intégrant un modèle véhicule ainsi qu'un profil de mission.

Cette plateforme est réalisée à l'ESTACA dans le cadre du projet collaboratif « O4A phase II » pour « Open for Autosar ».

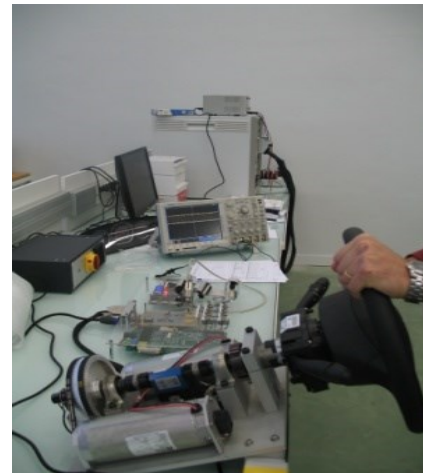


Figure 4 : Banc de test direction assistée électrique

10. Conclusion

Les architectures de réseaux embarqués ont considérablement évolué ces dernières années, pour intégrer de nouvelles fonctions et connecter des ECUs toujours plus nombreux. Les nouveaux réseaux comme le FlexRay offrent des possibilités importantes en termes de contrainte temps réel et de débit. La redondance de canaux intégrée dans le réseau FlexRay permet également d'intégrer les applications de type direction électrique.

Pendant ces architectures vont continuer à évoluer pour :

Diminuer le nombre de passerelles entre des réseaux hétérogènes. En parallèle, la tendance est également à la réduction du nombre d'ECUs, pour en conserver moins de 10 avec des capacités supérieures.

Intégrer les réseaux sans fils, à l'intérieur et à l'extérieur du véhicule

Utiliser les technologies à courant porteur pour transmettre les informations à travers les lignes d'alimentation du véhicule.

11. Références

- [1] K. Chaaban, P. Leserf, S. Saudrais «Steer-By-Wire System Development Using AUTOSAR Methodology», ETFA 2009.
- [2] Chaaban K., Simulation Of a Steer-By-Wire System Using FlexRay-based ECU Network, International conference on advances in computational tools for engineering applications, ACTEA 2009, Notre dame university, Lebanon, Juillet 2009
- [3] Wilwert, C.; YeQiong Song; Simonot-Lion, F.; Loria-Trio; Clement, T. "Evaluating quality of service and behavioral reliability of steer-by-wire systems", IEEE conference on Emerging, Technologies and Factory Automation, EFTA 2003.

Etude des bobines couplées et transmission d'énergie à distance sous conditions de résonance

Luc LASNE, François MUSSAUTE, Ken KRIEGER, Ali FARAH

Université de Bordeaux 1, Centre de Ressources en EEA, 351 Cours de la Libération, 33405 Talence cedex, France.

Contact e-mail : lasne@creea.u-bordeaux.fr

Résumé : Cet article aborde le problème du couplage magnétique de deux bobinages dont les flux ne sont pas dirigés par des matériaux ferromagnétiques, autrement dit de bobines « sans fer ». L'étude porte ainsi en un premier temps sur l'élaboration théorique d'un modèle électrique des bobines à couplages faibles ; l'exploitation de ce modèle à l'occasion d'une étude en fréquence permettant de mettre en évidence un phénomène de résonance dans la transmission de puissance existant entre les deux enroulements. Par ailleurs, une étude magnétostatique permet de privilégier certaines géométries et particularités physiques des bobinages utilisés. Enfin, les conditions mises en évidence, portant sur la géométrie et les résonances, sont utilisées, testées et validées autour de la réalisation d'une transmission de puissance de l'ordre de 60 W entre deux bobinages séparés de 50 cm environ.

1. Modélisation classique associée aux bobines d'induction

1.1. Cas de la bobine unique

Tout conducteur électrique, dès lors qu'il est parcouru par un courant, produit dans son environnement une répartition spatiale du vecteur « champ (ou excitation) magnétique » : \vec{H} et du vecteur « induction » : \vec{B} . La connaissance de ces deux vecteurs en tout point M de l'espace constitue la résolution du problème magnétique associé. Pourtant, une grandeur supplémentaire est très souvent utilisée : le « flux » de l'induction : ϕ .

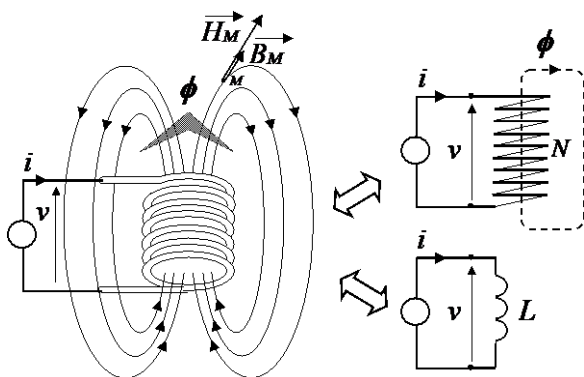


Figure 1 : Bobinage et flux propre

Le flux de \vec{B} à travers une surface S s'écrit :

$$\phi_S = \iint_S \vec{B} \cdot d\vec{S}$$

Cette grandeur scalaire est le plus souvent calculée de façon à sommer l'intégralité du champ produit par la bobine et on définit ainsi le « flux propre » ϕ comme celui traversant la section de la bobine. Il est alors très pratique, comme l'illustre la figure 1, de réduire la répartition complexe des lignes de champ produites par la bobine à la seule valeur de son flux propre, ou à la valeur de son « inductance ».

Dans ce cadre précis, il est ainsi important de retenir les notions (classiques) suivantes :

➤ La relation dite « d'Hopkinson » [1] permet de relier le flux propre aux « Ampère-tours » du bobinage à travers la formule :

$$N \cdot i = \mathfrak{R} \cdot \phi$$

NB : Le terme \mathfrak{R} , appelé « réluctance », dépend exclusivement de la géométrie du problème et des perméabilités magnétiques des matériaux rencontrés. Ce terme a une expression simple dans le cas de circuits magnétiques à lignes de champ canalisées mais se complique sérieusement lorsque ce n'est pas le cas.

➤ Il est alors possible de relier directement le « flux total » intercepté par le bobinage au courant qui l'a créé à travers la formule de « l'inductance propre » (auto-inductance) L :

$$N \cdot \phi = L \cdot i \quad \text{avec} \quad L = \frac{N^2}{\mathfrak{R}}$$

➤ Pour finir, la tension électrique v (en convention récepteur) associée au bobinage s'écrit, en vertu de la Loi de Lenz :

$$v(t) = N \cdot \frac{d\phi(t)}{dt} = L \cdot \frac{di(t)}{dt}$$

1.2. Cas de deux bobines en couplage total

Lorsque deux bobinages sont disposés à proximité, le « partage » de leurs lignes de champs représente un « couplage » magnétique. Le « couplage total » correspond simplement au fait que l'intégralité des lignes de champ traversant une bobine traverse également l'autre. Dans ce cas précis, représenté sur la figure 2, une grandeur supplémentaire M , appelée « inductance mutuelle » apparaît.

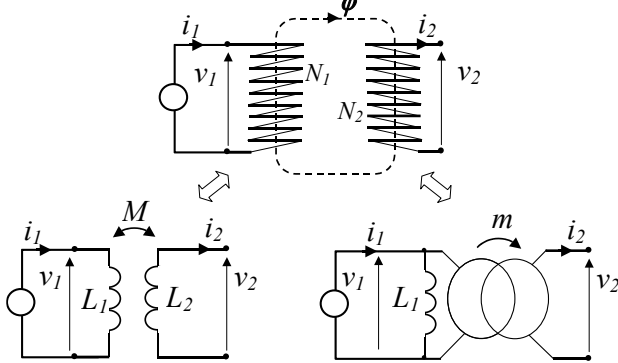


Figure 2 : Couplage total

Cette grandeur représente le fait que le bobinage 2 intercepte l'unique flux ϕ à travers ses N_2 spires ; la tension v_2 induite étant alors uniquement due aux variations du courant i_1 . Dans ce nouveau cadre, il est important de retenir les définitions suivantes :

➤ Au flux unique partagé par les deux bobines correspond le flux total intercepté par les N_2 spires :

$$N_2 \cdot \phi = M \cdot i_1 \quad \text{avec} \quad \phi = \frac{N_1 \cdot i_1}{\mathfrak{R}}$$

Ainsi :
$$M = \frac{N_1 \cdot N_2}{\mathfrak{R}}$$

➤ En faisant apparaître les inductances propres des deux bobines : $L_1 = \frac{N_1^2}{\mathfrak{R}}$ et $L_2 = \frac{N_2^2}{\mathfrak{R}}$, il vient :

$$M = \frac{N_1 \cdot N_2}{\mathfrak{R}} = \sqrt{L_1 \cdot L_2}$$

➤ L'inductance mutuelle M peut ainsi servir, lorsque $i_2=0$, à exprimer la tension induite aux bornes du bobinage 2 :

$$v_2(t) = N_2 \cdot \frac{d\phi(t)}{dt} = M \cdot \frac{di_1(t)}{dt}$$

En utilisant le fait que $v_1(t) = L_1 \frac{di_1(t)}{dt}$, il vient :

$$v_2(t) = \frac{M}{L_1} \cdot v_1(t) = \frac{N_2}{N_1} \cdot v_1(t) \quad (\text{avec } i_2=0)$$

➤ Le terme $m = \frac{M}{L_1} = \frac{N_2}{N_1}$ est appelé « rapport de transformation » des tensions et permet de ramener le

problème du couplage à la présence d'un transformateur idéal, représenté également sur la figure 2. Il est alors suffisant de justifier le flux mutuel par la présence d'une inductance unique, par exemple L_1 , en parallèle avec le transformateur.

1.3. Cas de deux bobines en couplage partiel

Lorsque le couplage n'est pas « total », il est impératif de bien dissocier les flux « propres » des bobines des flux « mutuels ». La figure 3 représente ainsi chacun des bobinages traversé à la fois par le flux mutuel ϕ et par un flux non partagé dit « de fuite » : ϕ_{f1} ou ϕ_{f2}

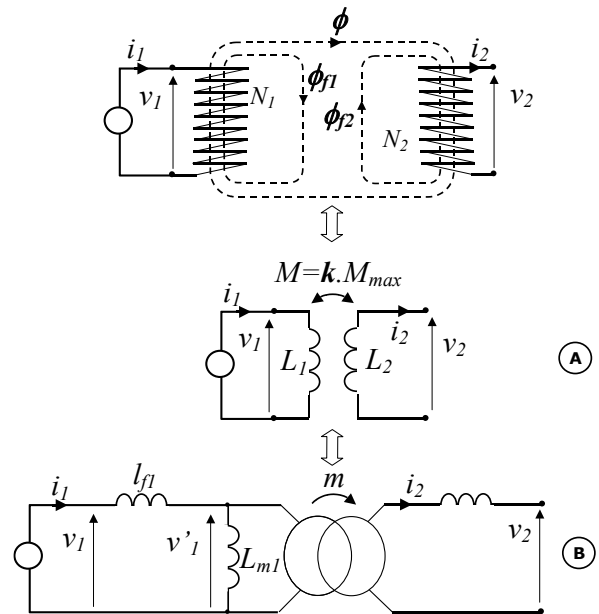


Figure 3 : Couplage partiel

Dans ces conditions, on peut formaliser le problème comme suit :

➤ Le flux mutuel étant diminué par les fuites, le flux total intercepté par le bobinage 2 est inférieur à celui résultant d'un couplage total (ou « maximal »).

On écrit ainsi : $N_2 \cdot \phi = M \cdot i_1 = k \cdot M_{\max} \cdot i_1$ où le terme $k \in [0,1]$ est appelé « coefficient de couplage » ; l'inductance mutuelle maximale étant donnée par :

$$M_{\max} = \sqrt{L_1 \cdot L_2}$$

➤ Le problème se ramène ainsi à la connaissance des deux inductances propres L_1 , L_2 et du coefficient de couplage (schéma A):

$$k = \frac{M}{\sqrt{L_1 \cdot L_2}}$$

La notion de coefficient de couplage peut pourtant être identifiée, comme le représente le schéma B de la figure 3, par un schéma équivalent organisé autour d'un transformateur idéal [2]. En effet, la séparation

des flux peut être interprétée comme la présence d'un flux dit « de fuite » relatif à chaque bobinage ; ce qui revient à la présence de deux « inductances de fuites » dans le schéma : L_{f1} et L_{f2} ; le flux mutuel étant alors ramené à l'inductance L_{m1} .

Démonstration :

$$v_1(t) = \frac{d(N_1 \cdot (\phi + \phi_{f1}))}{dt} = \frac{d(N_1 \cdot \phi)}{dt} + \frac{d(N_1 \cdot \phi_{f1})}{dt} \text{ soit :}$$

$$v_1(t) = L_{m1} \cdot \frac{di_1}{dt} + L_{f1} \cdot \frac{di_1}{dt}$$

Il est alors important, dans ce schéma de faire le lien avec les grandeurs précédentes en retenant que :

➤ La conservation des flux impose : $L_1 = L_{m1} + L_{f1}$ et $L_2 = L_{m2} + L_{f2}$, L_{m2} étant l'inductance du flux mutuel ramenée au secondaire du transformateur.

➤ Le rapport de transformation apparaissant dans le schéma s'écrira : $m = \frac{M}{L_{m1}} = \frac{\sqrt{L_{m1} \cdot L_{m2}}}{L_{m1}}$.

➤ Le bobinage 2 étant ouvert, la tension à ses bornes s'écrit : $v_2(t) = m \cdot v'_1(t)$; la formule du diviseur de tension donnant : $v'_1(t) = \frac{L_{m1}}{L_{m1} + L_{f1}} \cdot v_1(t)$.

Il vient alors :

$$v_2(t) = \frac{L_{m1}}{L_{m1} + L_{f1}} \cdot m \cdot v_1(t) = \frac{k \cdot \sqrt{L_1 \cdot L_2}}{L_1} \cdot v_1(t)$$

soit donc : $k \cdot \sqrt{L_1 \cdot L_2} = L_{m1} \cdot m = \sqrt{L_{m1} \cdot L_{m2}}$

Et on identifie ainsi : $k = \sqrt{\frac{L_{m1} \cdot L_{m2}}{L_1 \cdot L_2}}$, ou encore :

$$k = \sqrt{\frac{L_{m1} \cdot L_{m2}}{(L_{m1} + L_{f1}) \cdot (L_{m2} + L_{f2})}}$$

NB : Le couplage total est bien compatible avec cette formule puisque les inductances de fuites nulles ramènent le coefficient de couplage à l'unité.

NB : L'objectif de ce développement est de montrer qu'il est équivalent de raisonner sur le schéma équivalent de type A ou B, ce dernier étant très pratique puisque mettant en oeuvre un transformateur idéal dont les propriétés sont utiles à la construction de schémas équivalents simplifiés.

2. Bobines faiblement couplées, résonance et puissance transmissible

Deux bobines « faiblement couplées », présentent des flux de fuites importants, voire très supérieurs au flux commun. Si les modèles précédents permettent de bien formaliser cela à travers les inductances de fuites,

l'expérience montre que leur couplage est également soumis à un phénomène de résonance. En utilisant habilement ce dernier, il est alors possible de compenser les chutes de tensions dues aux inductances de fuite afin d'obtenir la tension v_2 maximale et l'impédance de sortie minimale.

Dans ce cadre, il est important de modéliser plus finement le couplage des deux bobines de manière à identifier les fréquences de résonances et optimiser leur facteur de qualité.

2.1. Schéma équivalent générique

Les modèles évoqués précédemment ne formalisent que la fonction « inductive » des bobines mises en présence. En réalité, chaque enroulement souffre à la fois de la résistance équivalente des conducteurs qui le composent et des condensateurs parasites associés aux différents matériaux isolants séparant les spires. Il est alors possible, au sein du schéma équivalent, de rajouter les éléments de modélisation associés, en obtenant ainsi le modèle complet de la figure 3.

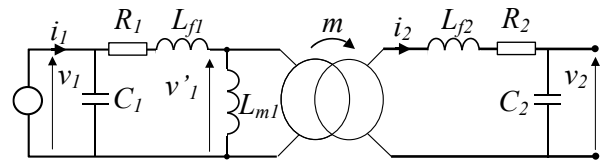


Figure 3 : Schéma équivalent complet

L'avantage du transformateur idéal apparaissant dans le circuit est qu'il permet de « ramener » les impédances du secondaire au primaire, le modèle complet pouvant alors se réduire, de façon générale, au schéma représenté sur la figure 4.

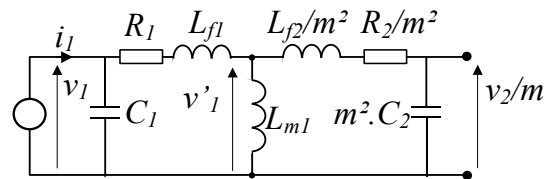


Figure 4 : Schéma ramené au primaire

2.2. Cas de deux bobines identiques, fonction de transfert et fréquence de résonance

Pour plusieurs raisons, le cas particulier de deux bobines identiques se révèle particulièrement intéressant à étudier. La première raison réside dans la simplification du schéma équivalent due aux constats suivants :

➤ Le rapport de transformation devient unitaire en raison de l'égalité des nombres de spires, soit :

$$m = \frac{N_2}{N_1} = 1.$$

➤ Les inductances propres sont égales, soit : $L_1=L_2=L$.

➤ Les inductances magnétisantes ramenées au primaire et secondaire sont égales, soit : $L_{m1}=L_{m2}=L_m$.

➤ L'expression du coefficient de couplage se simplifie alors également : $k = \sqrt{\frac{L_{m1} \cdot L_{m2}}{L_1 \cdot L_2}} = \frac{L_m}{L}$.

➤ Il vient alors : $L_m = k \cdot L$ et $L_{f1} = L_{f2} = L_f = L - L_m = (1-k) \cdot L$

➤ Enfin, les diverses résistances équivalentes et capacités parasites s'écrivent : $R_1=R_2=R$ et $C_1=C_2=C$.

Le schéma équivalent ramené au primaire revient ainsi à celui représenté sur la figure 5 :

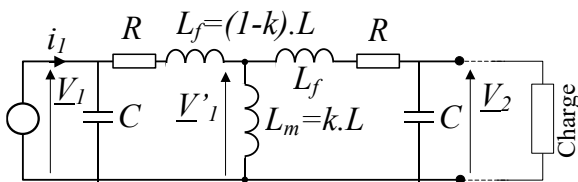


Figure 5 : Schéma simplifié

Afin de caractériser correctement la tension obtenue au secondaire et la puissance transmissible à une charge, il est suffisant de calculer les éléments du schéma équivalent de Thévenin [3] du modèle.

En un premier temps, la tension secondaire à vide s'écrit (les calculs intermédiaires, basés sur des formules de pont diviseur d'impédances, ne sont pas détaillés) :

$$V_{-2eq} = \frac{1/jC\omega}{1/jC\omega + R + j.L\omega} V_1, \text{ soit :}$$

$$V_{-2eq} = \frac{k.jL\omega.V_1}{R(1+j.RC\omega + j^2LC\omega^2) + j.L\omega.(1+j.RC\omega) + j.L\omega.j^2LC\omega^2.(1-k^2)}$$

Dans le cas du couplage faible, le coefficient de couplage k est bien inférieur à 1 et il est possible d'écrire $1-k^2 \cong 1$. Dans ce cas, l'expression de la tension secondaire à vide se simplifie et s'écrit :

$$V_{-2eq} \cong \frac{k.jL\omega}{(R + j.L\omega)(1 - LC\omega^2 + j.RC\omega)} \cdot V_1$$

Cette expression laisse apparaître clairement la pulsation et la fréquence de résonance :

$$\omega_0 = \frac{1}{\sqrt{LC}} \text{ et } f_0 = \frac{1}{2\pi \cdot \sqrt{LC}}$$

Une ultime simplification apparaît en considérant que $R \ll L\omega$ (ceci est vérifié expérimentalement), ce qui donne :

$$V_{-2eq} \cong \frac{k}{1 - LC\omega^2 + j.RC\omega} \cdot V_1$$

Ensuite, le calcul de l'impédance équivalente du modèle de Thévenin aboutit, grâce aux hypothèses $1-k^2 \cong 1$ et $R \ll L\omega$, à l'expression simple suivante :

$$Z_{eq} \cong \frac{R + j.L\omega}{1 - LC\omega^2 + j.RC\omega}$$

Le schéma de la figure 5 se réduit ainsi à l'association série représentée sur la figure 6.

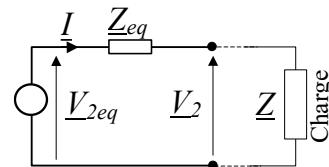


Figure 6 : Equivalent de Thévenin

2.3. Conclusion intermédiaire portant sur un couple de bobines identiques

Il est important, à partir des calculs précédents, de bien noter les particularités suivantes :

➤ La fréquence de résonance est unique et ne dépend que des grandeurs constantes L et C . Elle ne dépend pas, dans le cas du couplage faible, c'est à dire en dehors du champ proche, du coefficient de couplage. Cette remarque est de première importance dans l'objectif d'un fonctionnement à récepteur mobile. Pour illustrer ceci, la figure 7 représente le diagramme de Bode de la fonction de transfert du circuit :

$$\frac{V_{-2eq}}{V_1}(j\omega)$$

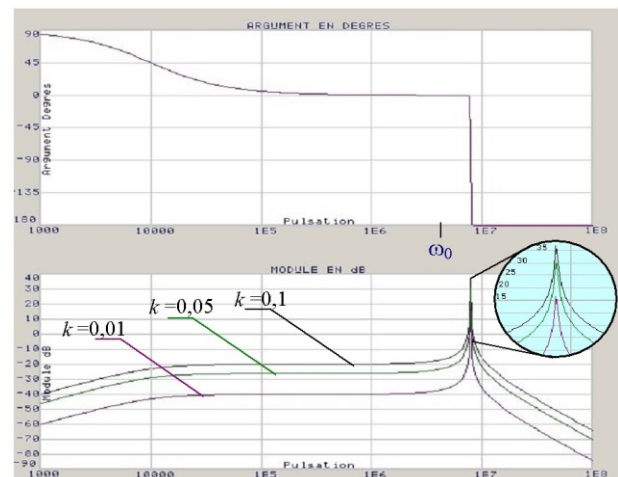


Figure 7 : Fonction de transfert [4]

➤ A la résonance, la tension V_{2eq} est maximale et conforme à la relation suivante :

$$V_{2eq \max} \cong \frac{k}{j.R.C\omega_0} \cdot V_{-1}$$

➤ Cette expression peut être présentée sous la forme : $V_{2eq \max} \cong -j.Q.kV_{-1} = \frac{k}{j.2\xi} V_{-1}$ où Q est le facteur de qualité ($Q = \frac{L.\omega_0}{R}$) et ξ le coefficient d'amortissement ($2\xi = R\sqrt{\frac{C}{L}}$).

➤ A la résonance également, l'impédance équivalente de Thévenin se réduit à :

$$Z_{eq \min} \cong \frac{R+j.L\omega}{j.RC\omega} \cong \frac{L}{R.C} \quad (\text{si } R \ll L\omega)$$

Il faut bien noter dans cette expression que L est proportionnelle à N^2 et R à N , autrement dit ces deux grandeurs sont dépendantes du nombre de spires N et on retiendra :

$$V_{2 \max} \propto \frac{k}{\sqrt{C}} \cdot V_1 \quad \text{et} \quad Z_{eq \min} \propto \frac{N}{C}$$

➤ Enfin, connaissant le modèle de Thévenin à la résonance du système, il est facile d'exprimer la puissance maximale transmissible à la charge (voir *figure 8*). Celle-ci correspond au cas de l'adaptation d'impédances, c'est à dire à $Z = Z_{eq \min}^* = \frac{L}{R.C}$.

L'expression de la puissance maximale est ainsi :

$$P_{\max} = \frac{V_{2 \max}^2}{4.Z_{eq \min}} \cong \frac{k^2.V_1^2}{4.R}$$

Cette expression révèle ainsi que la puissance maximale transmissible est limitée de façon prépondérante par la résistance parasite des enroulements : R . En d'autres termes il n'est possible de faire croître cette puissance qu'en n'utilisant qu'un nombre réduit de spires d'un conducteur spécialement choisi en regard de la gamme de fréquence. Enfin, cette résistance étant fixée, le réglage de la tension d'entrée V_1 semble le seul moyen de compenser l'action du coefficient de couplage. On retiendra ainsi la proportionnalité suivante :

$$P_{\max} \propto \frac{k^2.V_1^2}{R}$$

ainsi que les notions résumées sur la *figure 8* :

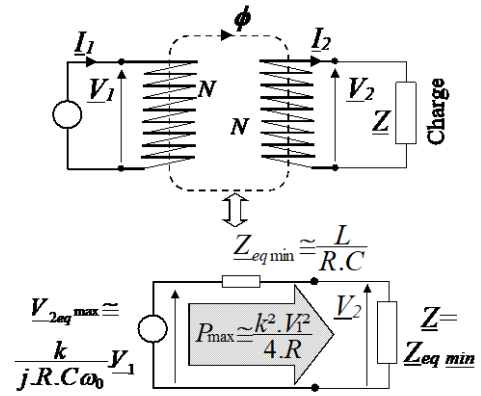


Figure 8 : Transmission de puissance à $f = f_0$

2.5. Cas de deux bobines différentes

Le couplage de deux bobines « différentes », c'est à dire composées de nombres de spires non identiques et de géométries non semblables, est intéressant dans l'absolu. En revanche, ce cas semble être défavorable en termes de résonance. Cette étude se limite ainsi au cas particulier d'enroulements identiques résonant à une seule fréquence rendant extrêmes toutes les grandeurs du système. Cependant, l'approche généraliste portant sur le schéma équivalent de la *figure 4* semble incontournable et fera l'objet d'une étude future.

3. Conditions d'optimisation du transfert de puissance ou du rendement

Si l'objectif du montage est la transmission de la puissance maximale P_{\max} vers la charge, il est nécessaire d'assurer l'adaptation d'impédance du système. Dans ces conditions il suffit de vérifier les conditions suivantes :

➤ La charge doit être résistive pure ($Z = R_{charge}$) puisque l'impédance équivalente de Thévenin l'est aussi à la résonance.

➤ La connaissance de la puissance désirée P_{\max} et de la tension reçue par la charge permet de calculer :

$$R_{charge} = \frac{V_2^2}{P}$$

➤ La résistance et l'inductance des bobinages étant fixés, il est néanmoins possible de placer un condensateur d'adaptation C_{adapt} en parallèle sur le bobinage récepteur. L'adaptation d'impédances sera alors assurée si $Z_{eq \min} = \frac{L}{R.(C+C_{adapt})} = R_{charge}$.

➤ La fréquence de résonance présentera alors la valeur : $f_0 = \frac{1}{2\pi.\sqrt{L.(C+C_{adapt})}}$.

➤ Le rendement du système sera alors borné par la valeur 0,5.

➤ La connaissance du produit $k.V_1 = \sqrt{4.R.P_{max}}$ permettra enfin de fixer la distance maximale à partir de la tension maximale disponible ou encore de calculer quelle tension d'entrée est nécessaire au transfert de puissance à une distance donnée (la distance fixant le coefficient k).

➤ Il est par ailleurs possible de rajouter le condensateur C_{adapt} uniquement pour abaisser la fréquence de résonance et la rendre compatible avec les caractéristiques des convertisseurs à découpages (qui présentent d'excellents rendements).

Si l'objectif du montage réside dans le respect d'un rendement élevé, il sera suffisant de calculer la valeur de la capacité C_{adapt} à rajouter de manière à rendre l'impédance $Z_{eq\ min}$ petite devant R_{charge} . Dans ce cas là, le circuit fonctionnera bien évidemment très en deçà de sa puissance maximale.

4. Approche géométrique des bobines

Si la mise en équation du couplage de deux enroulements révèle l'utilité du phénomène de résonance, il semble également important de formaliser quelles géométries particulières semblent propices à la transmission d'énergie à distance. Pour cela, l'utilisation d'un logiciel de calcul en magnéto-statique par éléments finis [5] est appréciable et permet de simuler le rayonnement de plusieurs géométries. La figure 9 illustre quelques simulations 2D réalisées autour de solénoïdes plus ou moins longs et à rayons plus ou moins importants ; l'ensemble des calculs portant sur un nombre d'Ampère-tour identiques (10 At).

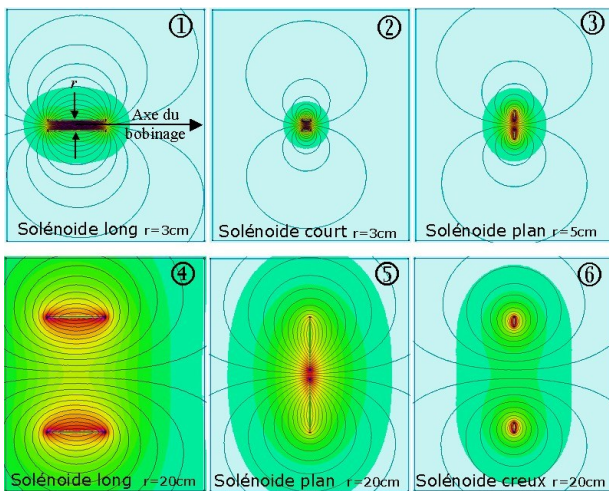


Figure 9 : Simulations magnéto-statiques à 10At [5]

Il semble ainsi, visuellement du moins, plus intéressant d'utiliser un bobinage de rayon important de manière produire une induction mieux répartie dans son

environnement. Enfin, un bobinage étroit, voire plan, permet à la décroissance du champ d'être peu dépendante de la distance à l'axe. En d'autres termes, ce type d'enroulement produit un front de décroissance de l'induction pratiquement plan, ce qui est intéressant puisque alors le bobinage récepteur n'a pas besoin d'être exactement centré avec l'émetteur.

A partir de ces simulations, les courbes représentant les évolutions de l'induction tangentielle en fonction de la distance D on été reportées sur la figure 10.

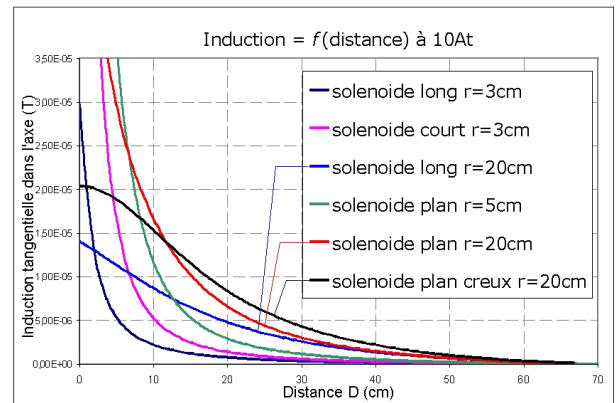
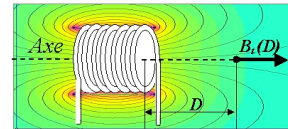


Figure 10 : Courbes Induction / Distance à 10 At

Quantitativement, le bobinage plan semble donc être le meilleur compromis en champ lointain, ce qui conforte les remarques précédentes. Il conviendra ainsi de s'orienter plutôt vers des solutions de type « disque » éventuellement creux puisque la simulation ne fait apparaître le bénéfice des spires centrales que dans l'environnement proche du solénoïde.

5. Réalisation pratique, tests, mesures et confrontation du modèle

Une fois les conditions portant sur la résonance et les géométries du problème mises en évidence, il devient facile de réaliser un transfert d'énergie conséquent entre deux enroulements. Les calculs et la réalisation ont été orientés de manière à espérer un transfert de puissance de l'ordre de 60 W entre deux bobinages distants de 50 cm environ.

5.1. Schéma électrique et calculs

Le principe retenu pour l'alimentation en tension du bobinage primaire est celui d'un onduleur monophasé commandé en fréquence [6] (voir figure 11). La tension produite par cet organe est obtenue après le redressement de la tension du réseau électrique et présente un forme carrée symétrique (+V / -V) permettant d'imposer la tension primaire

$$V_{fond} = \frac{4.V}{\pi}$$

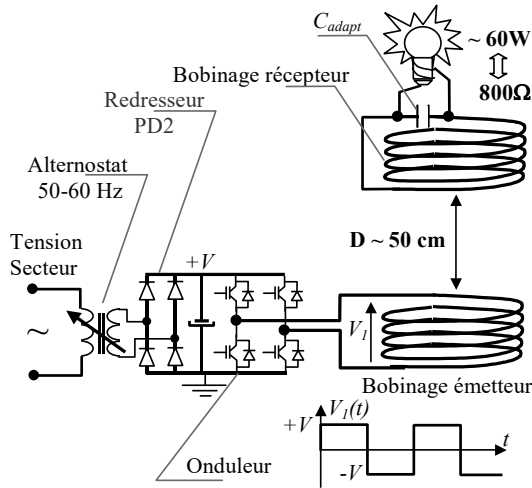


Figure 11 : Schéma électrique

L'objectif de ce montage est de fournir 60 W à l'ampoule (230 V) utilisée comme charge, c'est à dire à l'impédance $Z = \frac{230^2}{60} \approx 800 \Omega$.

Parallèlement, deux bobines planes identiques de 10 spires de 30 cm de rayon maximal sont réalisées, et apparaissent sur la photographie de la figure 12.

Les caractéristiques de ces bobines, détaillées ci dessous, sont mesurées par analyse d'impédance.

- $R=0,4 \Omega$: Résistance série de chaque bobine ($R=R_1=R_2$).
- $L=40 \mu\text{H}$: Inductance propre de chaque bobine ($L=L_1=L_2$).
- $C=0,44 \text{ nF}$: Capacité parasite de chaque bobine ($C=C_1=C_2$).

Ces valeurs permettent alors, dans le cadre de la résonance et de l'adaptation d'impédance, dont les formules importantes sont résumées sur la figure 8 et dans la partie 3, d'écrire :

$$Z=800 \Omega = Z_{eq \min} = \frac{L}{R.(C+C_{adapt})}$$

- L'adaptation d'impédances serait alors assurée en présence d'une capacité équivalente au secondaire :

$$C_{adapt} = \frac{L}{R.Z_{eq \min}} - C \approx 125 \text{ nF}$$

NB : La résistance R risquant d'être supérieure à la valeur mesurée à cause de l'effet de peau et de la montée en température des fils, on se satisfera de la valeur : $C_{adapt} \approx 100 \text{ nF}$.

- La fréquence de résonance du système étant alors :

$$f_0 = \frac{1}{2\pi\sqrt{L(C_{adapt}+C)}} \approx 70 \text{ kHz}$$

5.2. Performances et mesures

Le dispositif expérimental réalisé, conforme aux spécifications précédentes, est visible sur la figure 12. Seuls les bobinages (10 spires chacun, réparties sur trois diamètres différents), la capacité additionnelle et la charge (l'ampoule de 60 W) y apparaissent et l'ensemble du circuit d'alimentation du bobinage émetteur n'est pas visible.

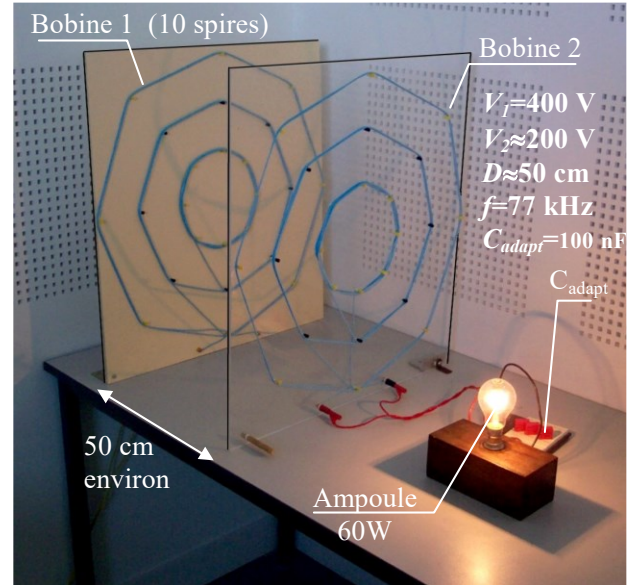


Figure 12 : Photographie du dispositif en charge

NB : Le dispositif est utilisé ici dans l'objectif d'alimenter une ampoule mais peut tout aussi bien être destiné à une charge différente, à condition qu'elle soit résistive et « adaptée » dans le cas de puissances importantes (de l'ordre de quelques dizaines de watts).

L'expérience et les mesures réalisés autorisent les déductions suivantes :

- La fréquence de résonance du système ne dépend pas du coefficient de couplage, et donc de la disposition ou de la distance séparant les deux bobinages.
- L'utilisation d'une capacité additionnelle vouée à l'adaptation d'impédances donne de très bons résultats et permet également de faire chuter la fréquence de résonance à des valeurs autorisant l'usage de dispositifs à découpages.
- Seule la résonance du dispositif permet un transfert de puissance conséquent entre les deux bobines ; le facteur de qualité étant alors de première importance. Lorsque le coefficient de couplage n'est pas trop faible, l'effet amplificateur du dispositif est d'ailleurs manifeste.

La figure 13 représente les diagrammes de Bode théorique et mesuré [4] de la fonction de transfert

$$\frac{V_{2eq}}{V_1}(j\omega)$$

La concordance des résultats confirme la validité du modèle élaboré au cours de la partie 2.

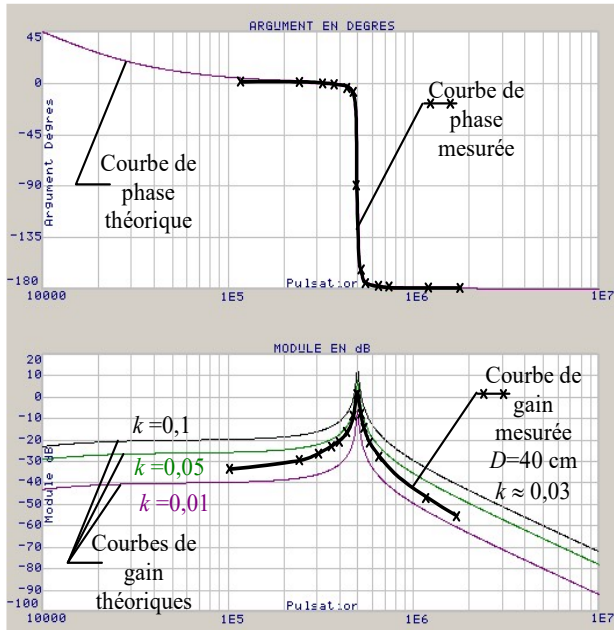


Figure 13 : fonction de transfert mesurée et théorique

NB : La réalisation du diagramme de Bode expérimental permet indirectement une mesure du coefficient de couplage. Celle-ci est aussi possible à partir du simple relevé de la tension maximale à vide en fonction de la distance.

➤ Dans l'objectif d'une transmission de puissance faible (quelques 100 mW), la distance entre les bobines peut atteindre quelques mètres et la capacité permet de modifier soit l'adaptation d'impédances soit la valeur du rendement du système.

Par ailleurs, la figure 14 présente le relevé de la tension secondaire **en charge** en fonction de la distance. Deux courbes particulières sont relevées, l'une permettant de maintenir la charge sous 220V à 20 cm et l'autre à 40 cm. La tension continue $+V$ nécessaire évoluant considérablement avec la distance, il est possible d'en déduire les remarques suivantes :

➤ Dans l'hypothèse d'une application à bobinage récepteur mobile, une régulation portant sur la valeur de la tension continue alimentant l'onduleur ($+V$) semble nécessaire et doit permettre d'ajuster automatiquement la tension reçue à une valeur de consigne.

➤ Etant donné l'ordre de grandeur de la tension nécessaire au passage de 60 W au delà de 50 cm, il semble que ce type de dispositif soit tout à fait limité à des distances de l'ordre du mètre.

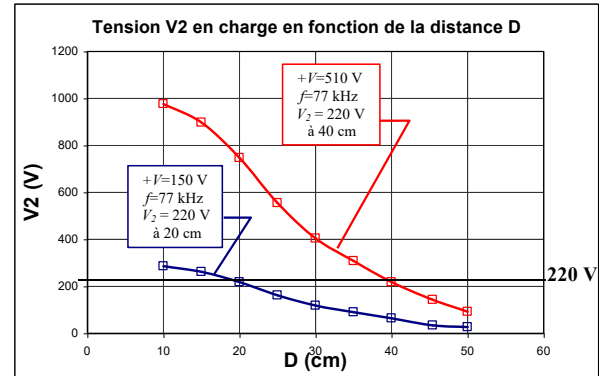


Figure 14 : Tension en charge et distance

➤ Enfin, le **rendement** du système fonctionnant à l'adaptation d'impédance est théoriquement de **0,5**. En pratique, et de par les pertes supplémentaires liées au fonctionnement de l'onduleur, le rendement minimal approche la valeur 0,4. Il est toutefois possible d'atteindre une valeur plus haute en choisissant une charge non adaptée, l'expression du rendement [7] étant :

$$\eta = \frac{Z}{Z + Z_{eq\min}} > 0,5 \text{ si } Z > Z_{eq\min} .$$

6. Conclusion

Le couplage faible entre deux bobines « sans fer » fait apparaître un phénomène de résonance particulièrement intéressant. Il est possible de résumer l'action de ce phénomène en disant que le facteur de qualité du circuit réalisé par le couplage magnétique compense le coefficient de couplage dû à l'espacement des deux bobinages. En terme de puissance, et lorsque les bobinages utilisés présentent un nombre de spires relativement faible et une géométrie idoine, un transfert de l'ordre de quelques dizaines de watts peut être envisagé à partir d'une tension d'alimentation inférieure à 500 V ; la distance maximale autorisant ces ordres de grandeurs semblant être limitée à l'ordre de grandeur du mètre.

Dans l'optique de l'alimentation de récepteurs de petites puissances, il semble néanmoins très prometteur de mettre en œuvre une régulation de la tension d'alimentation du montage permettant d'obtenir une tension fixe au niveau du récepteur. Enfin, et au regard des possibilités de réglage et d'optimisation du système étudié, il apparaît tout à fait possible de transmettre des puissances de l'ordre de quelques watts sur plusieurs mètres avec un bon rendement (0,6 à 0,8). Dans ce cas précis, le système devra être calculé pour fonctionner bien en deçà de sa puissance maximale transmissible. L'alimentation à distance d'appareils électroportatifs semble alors aujourd'hui à portée de main.

7. Bibliographie, remarques et liens

[1] : La relation d'Hopkinson est présentée dans de nombreux livres d'électrotechnique et de physique, par exemple : **Electrotechnique**, Luc Lasne - DUNOD 2008 ISBN 978-2-10-050720-7.

[2] : La construction du schéma équivalent d'un transformateur apparaît dans un grand nombre d'ouvrages classiques (voir [1]).

[3] : Le modèle équivalent de Thévenin est une modélisation classique des circuits électriques linéaires. Consulter des ouvrages tels que **Génie Electronique**, Mérat, Moreau, Allay - NATHAN ISBN 978-2-09-177983-6 ou **Electrotechnique**, Luc Lasne - DUNOD 2008.

[4] : Diagramme réalisé à l'aide du logiciel TPA, Stéphane Ygorra :

<http://www.creea.u-bordeaux.fr/download/Tpa.zip>

[5] : Logiciel de calcul magnétostatique et électrostatique 2D « F.E.M.M. » - site Internet officiel :

<http://femm.foster-miller.net/wiki/HomePage>

[6] : Consulter un ouvrage d'électronique de puissance pour précisions.

[7] : Une étude portant sur le couple « rendement / puissance maximale transmissible » est disponible à partir du lien : http://www.creea.u-bordeaux.fr/download/Rendement_des_systemes_electriques.pdf

Liens et articles connexes

➤ Le site Wikipédia® présente plusieurs pages associées à la transmission sans fil. Entrer les mots clés « transmission d'énergie sans fil » ou « witrlicity » sur : <http://fr.wikipedia.org/wiki/Accueil>

En 2007, une équipe du M.I.T. a réalisé une transmission de puissance de 60 W avec une distance de 2 m séparant les deux bobinages. C'est à cette occasion que le terme « witrlicity » est apparu (contraction de « **Wireless Electricity** »). Cette équipe a obtenu un prix pour continuer ses recherches. Les articles publiés par cette équipe sont disponibles sur la page :

http://www.mit.edu/~soljaic/wireless_power.html

Ces articles néanmoins, présentent une approche très générale du problème, des notations assez indigestes pour les francophones et sont totalement exempts de schémas électriques équivalents. Est-ce volontaire ?

➤ Un article de 2002, assez général sur la transmission d'énergie sans fil, aborde également le cas des bobines couplées à la résonance : http://www.satie.ens-cachan.fr/jeea2002/ArticlesPDF/Costa_EnergiePortabl e2002.pdf

➤ La revue Elektor de Janvier 2008 a également abordé la transmission d'énergie sans fil. Cet article est intéressant même s'il n'aborde absolument pas l'étude de la résonance du système et de son adaptation d'impédances.

Initiation à la conversion de l'énergie électrique : exemple sur un micro-système de production photovoltaïque

Frédéric GIRAUD, Jean-François SERGENT, Michel AMBERG, Yvonnick LE MÉNACH

Université des Sciences et Technologie de Lille

Cité Scientifique 59655 Villeneuve d'Ascq

prenom.nom@univ-lille1.fr

Résumé : comment sensibiliser les étudiants aux métiers du génie électrique, leur montrer les enjeux pour l'avenir liés à cette discipline et leur donner le goût pour la filière ? Comment animer une séquence pédagogique sans s'appuyer sur des pré-requis classiques compte tenu de l'origine variée des étudiants ? C'est pour répondre en partie à ces objectifs qu'a été créée une séquence de travaux pratiques utilisant des panneaux solaires de faibles dimensions associés à une chaîne de conversion de l'énergie électrique. Pendant la séance, les étudiants travaillent sur un thème actuel, sur lequel on montre l'intérêt d'une conversion efficace de l'énergie. L'article détaille la séquence, la réalisation pratique et le matériel utilisé.

1. Introduction

Les étudiants de licence de l'Université de Lille peuvent avoir très vite accès à une initiation au génie électrique dès le premier semestre, c'est à dire à leur entrée à l'Université. Cependant, au moment de cette unité d'enseignement, ils ne sont pas encore déterminés, si bien qu'ils pourront poursuivre soit dans la discipline, soit dans un tout autre domaine (chimie, mécanique, ...). L'unité doit donc nécessiter peu de pré-requis à l'entrée et fournir peu de connaissances pratiques ou fondamentales qui soient des pré-requis dans la suite de leurs études. Il est donc nécessaire de trouver une approche efficace pour d'une part assurer un contenu cohérent, et d'autre part véhiculer une image moderne et positive de la discipline puisque ce sera peut-être la seule.

Aujourd'hui, les énergies dites renouvelables occupent une place de choix dans le débat sur l'environnement, et nos étudiants sont ainsi très vite sensibilisés à leur utilité et leur potentiel. Cela constitue donc d'emblée un sujet captivant, que nous avons choisi d'exploiter pour aborder un thème du génie électrique : la conversion d'énergie.

Ainsi cet article décrit dans un premier paragraphe une séance de travaux pratiques sur ce thème. Puis, la réalisation technique est détaillée, et notamment les convertisseurs employés.

2. Déroulement de la séquence de travaux pratiques.

2.1. Le matériel à disposition

Les étudiants disposent tous d'un panneau solaire de faibles dimensions qu'ils peuvent manipuler à leur guise et déplacer à l'extérieur du bâtiment (figure 1). Les appareils de mesure de courant et de tension sont également disponibles en libre service, avec un affichage sous forme numérique ou à aiguille.

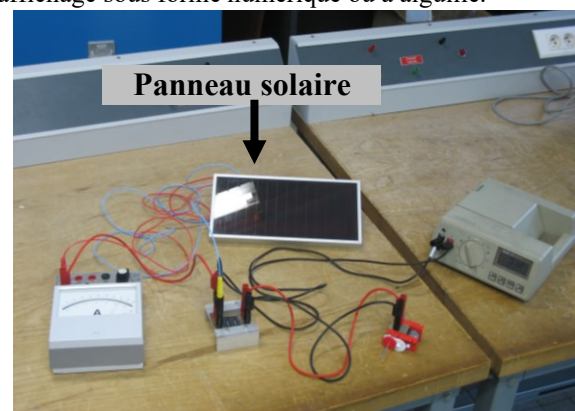


Figure 1 : panneau solaire et instruments de mesure

Ils disposent également d'un petit bloc moteur de 1,5V de tension nominale associé à un ensemble réducteur et qui constituera la charge de notre système de conversion d'énergie. Un dispositif de stockage – réalisé à partir de supercondensateurs de $C=10F$ de 2,5V de tension nominale – est également disponible (figure 2), tandis que deux hacheurs abaisseurs joueront le rôle de « chargeur de batterie » ou de régulateur de vitesse. Il est à noter que les étudiants ne sont pas tenus de savoir

produire un schéma de câblage (cette compétence arrive plus tard dans le cursus), ils sont donc guidés dans cette partie.

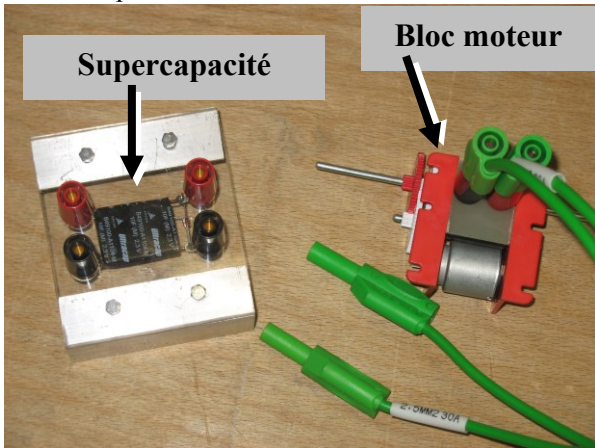


Figure 2 : Supercapacité et bloc moteur

2.2. Association directe

Dans une première manipulation, les étudiants sont invités à brancher directement la charge (le moteur) sur le panneau solaire (figure 3). Cette manipulation est possible car l'énergie électrique est produite sous forme d'une tension ou d'un courant continu, ce qui est également la nature de l'énergie nécessaire à la charge.

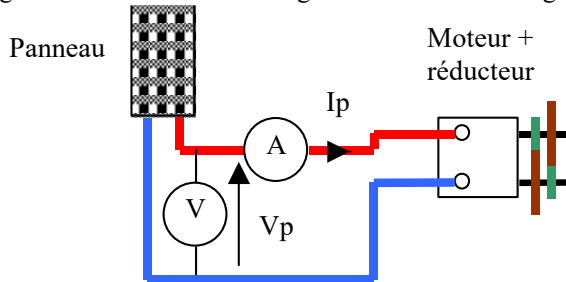


Figure 3 : Schéma de câblage ; première expérience

Au cours de cette manipulation, les étudiants notent si le moteur tourne ou pas (par jour de très beau temps le moteur peut tourner, mais ce n'est pas toujours le cas), et si la rotation est sensible à l'éclairement ou l'orientation. L'objectif de cette partie est de montrer que, si il y a bien production d'énergie, elle n'est pas utilisée de la bonne manière puisque le moteur tourne de manière incontrôlée. Si l'éclairement n'est pas suffisant, nous montrons qu'apparemment le panneau n'est pas assez puissant pour alimenter le moteur, ce qui est faux comme la suite de la séance va le montrer.

Par exemple, lors d'un essai nous avons obtenu :

$I_p=0.028A$	$V_p=0V$
--------------	----------

Ensuite, les étudiants placent les mesures de la tension et du courant sur la caractéristique du panneau, relevée au préalable et pour différents éclaircissements. Ils expliquent alors pourquoi le moteur tourne ou pas : le moteur n'est pas dans ses conditions de fonctionnement nominales, la tension est trop faible.

2.3. Introduction d'un élément de stockage

Dans cette deuxième manipulation, les étudiants insèrent l'élément de stockage en parallèle sur le panneau (figure 4). Ils laissent d'abord se charger la supercapacité, qu'ils déchargent ensuite dans le moteur.

Ils mesurent dans cet essai :

$I_p=0.028A$	$V_p=0V$ jusqu'à 2,5V
--------------	-----------------------

Ils constatent alors que le moteur tourne mieux, plus vite, ou bien – s'il ne tournait pas auparavant – que le panneau peut effectivement fournir l'énergie nécessaire à la rotation du moteur, il suffit simplement de stocker pour restituer. En général, à ce stade, les étudiants sont surpris d'obtenir quelque chose qu'ils ne croyaient pas possible auparavant : la mise en route du moteur, ou une rotation rapide.

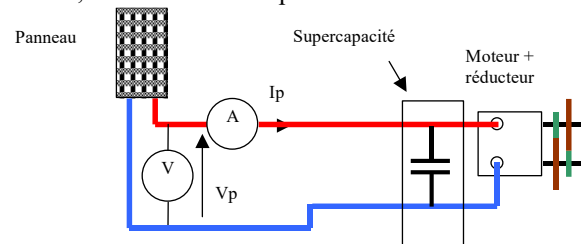


Figure 4 : Schéma de câblage avec stockage

A nouveau, ils placent le point de fonctionnement courant-tension sur la caractéristique du panneau lors de la phase de recharge de l'élément de stockage. A partir de la mesure du courant du moteur, ils peuvent même esquisser un diagramme de flux de puissance, et expliquer que la puissance consommée provient en partie du panneau (en faible proportion) et en partie de l'élément de stockage (en plus forte proportion). Ils peuvent expliquer que l'énergie fournie par les capacités a pour conséquence une diminution de la tension de celle-ci, en appliquant la formule qu'ils connaissent :

$$\Delta E = \frac{1}{2} C (V_f^2 - V_i^2)$$

Cependant, ils constatent que la vitesse de rotation du moteur n'est pas fixe, et que le temps de recharge est long comparé au temps de fonctionnement effectif du moteur. Ils sont d'ailleurs amenés à mesurer le temps de recharge et le temps de décharge. Pour les conditions lumineuses du jour de l'essai, nous avons :

Temps de charge : 14min	Décharge : 60sec
-------------------------	------------------

2.4. Conversion de l'énergie

Nous demandons alors aux étudiants quelle serait selon eux une chaîne de conversion optimale, compte tenu de la nature très différente des sources, charges et de stockage. Notons qu'ils ont été préparés à cette question par un ensemble de séances de TD, et que la solution met en œuvre un convertisseur \neq pour adapter la tension de sortie des panneaux à celle des

supercapacités, et un autre convertisseur \neq pour adapter la vitesse de rotation.

En premier lieu, le « chargeur de batterie » réalisé sur la base d'un hacheur abaisseur contrôlé en MPPT, assure une recharge beaucoup plus rapide de la supercapacité. On demande aux étudiants de relever la tension aux bornes du panneau, et le courant qui le traverse, et de faire les mêmes relevés au niveau de la supercapacité. Nous pointons alors du doigt plusieurs faits. Tout d'abord, nous expliquons ce qu'est le point de fonctionnement à puissance maximale et nous montrons que le panneau fonctionne dans ce mode. Puis, nous démontrons par la mesure que la puissance fournie par le panneau se retrouve à quelques pertes près sur l'élément de stockage. Ce point est important, il montre que si tension et courant sont changés à l'entrée, la puissance est conservée par la transformation : c'est l'invariant. Enfin, une mesure du temps de charge de l'élément de stockage montre le gain concrètement obtenu par l'introduction de cet élément.

Le jour de l'essai, nous mesurons :

$I_p=0.012A$	$V_p=17,8V$
$I_{sc}=0,086A$	$V_{sc}=2,5V$

Le temps de charge est ainsi considérablement réduit, puisqu'il passe de 14min à 3min. A ce stade, les étudiants remarquent qu'une gestion saine de l'énergie électrique permet de tirer le maximum d'un équipement. Nous leur montrons – à titre d'illustration uniquement – de quoi se compose le « chargeur de batterie » : condensateur, inductance, transistor et diode, et un microcontrôleur pour réaliser le MPPT. Il s'en suit une discussion autour des métiers du génie électrique. Nous expliquons que les métiers consistent à inventer des concepts de chaînes de conversion de

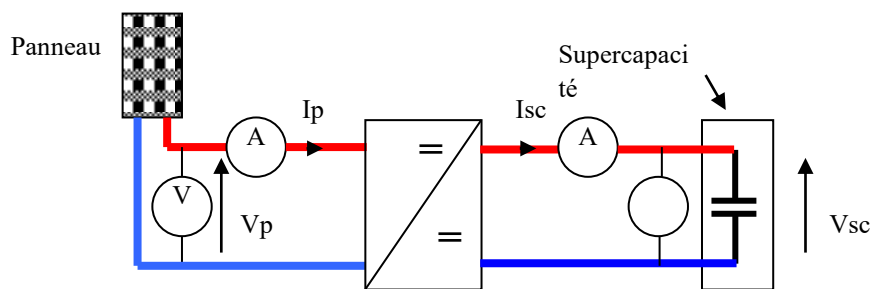


Figure 5 : Insertion d'un CVs fonctionnant en MPPT (voir aussi figure 7)

l'énergie électrique, puis de créer les modulateurs afin qu'ils produisent le moins de perte possible, et qu'à la fin, nous devons produire également des stratégies pour contrôler de la manière la plus efficace ces dispositifs.

3. Réalisation

3.1. Le hacheur en MPPT

Compte tenu de la tension au maximum de puissance des panneaux solaires choisis ($V_p=17,8$ volts environ) et de la tension maximale que peuvent supporter les supercapacités constituant l'élément d'accumulation d'énergie électrique, nous avons choisi une structure abaisseur pour constituer le convertisseur continu-continu de l'étage de recharge des « batteries ».

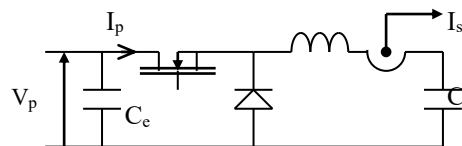


Figure 6 : hacheur abaisseur « chargeur » de batterie

Le dimensionnement de ce hacheur n'a rien de particulier, sauf que les composants sont choisis de manière à présenter peu de perte en fonctionnement. La fréquence de fonctionnement est ainsi imposée à 5kHz, et nous avons réalisé L afin qu'elle demeure dans sa zone de fonctionnement linéaire. Par ailleurs, sa valeur est déterminée pour autoriser une ondulation de 30% de la valeur nominale du courant. Signalons qu'au maximum, la puissance délivrée par le panneau est de 2,1W. Ces considérations amènent :

- à calculer la valeur du rapport cyclique α du hacheur au régime nominal et au MPPT

$$\alpha = \frac{V_{sc}}{V_p} = \frac{2,5}{17,8} = 0,14$$

- à calculer la valeur moyenne de i_p au MPPT :

$$i_p = \frac{P}{V_p} = \frac{2,1}{17,8} = 0,118A$$

- à calculer la valeur moyenne de i_{sc} au MPPT :

$$i_{sc} = \frac{P}{V_s} = \frac{2,1}{2,5} = 0,84A$$

- à calculer la valeur de L :

$$\Delta i = \frac{\alpha(1-\alpha)E}{Lf} \Rightarrow$$

$$L = \frac{\alpha(1-\alpha)E}{\Delta if}$$

$$= \frac{0,14 \times (1-0,14) \times 17,8}{0,3 \times 0,84 \times 5000} = 1,7mH$$

Cette inductance a été réalisée par le bobinage de 100 tours d'un fil de diamètre de 0.56mm de diamètre sur un pot ferrite de type RM14.

La cellule de commutation est un circuit MOSIRF7380 de International rectifier, fonctionnant en réalité en redressement synchrone. La diode de roue libre est donc inutile ; par ailleurs, les éventuels fonctionnements en conduction discontinue sont évités. Ces interrupteurs, disponibles dans un boîtier CMS, sont commandés par un driver bootstrap LM27222 nécessitant relativement peu de composants extérieurs.

La réalisation du MPPT est assurée par un PIC 12C672 de 8 broches contrôlant les interrupteurs. Une pile 9V permet l'alimentation du système MPPT. L'énergie produite par cette pile n'intervient pas dans les bilans de puissance. Par ailleurs, afin de lever la suspicion quant à la réelle utilité de la production d'énergie électrique par panneaux photovoltaïques, cette pile peut être une pile rechargeable, rechargée par les panneaux solaires entre deux séances.

La réalisation finale est présentée à la figure 7, la liste précise des composants, et le typon de la réalisation peuvent être téléchargés sur demande en [1].

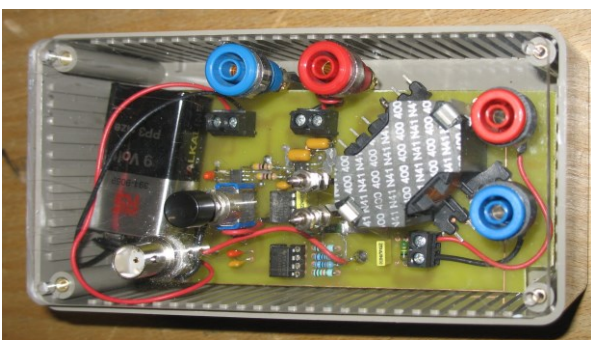


Figure 7 : Chargeur de batterie en MPPT

3.2. Programmation de la MPPT

Plusieurs méthodes de détection de point à maximum de puissance existent. Nous nous sommes basés sur une méthode appelée « perturbe & observe » qui consiste à modifier en permanence le point de

fonctionnement et à observer dans quel sens évolue la puissance produite par le panneau.

Cependant, afin de réduire la puissance de calcul nécessaire à cette recherche de point, remarquons dans un premier temps que la puissance délivrée par les panneaux s'exprime en fonction des tension/courant coté sortie du hacheur [2] :

$$P = V_p I_p = V_{sc} I_{sc}$$

Ensuite, supposons que la tension des supercondensateurs demeure constante. Cette approximation est valable puisque le temps de chargement de la supercondensateur (3min) est long comparé à la période du MPPT (le dixième de seconde). Dans ce cas, le point optimum pour la puissance correspond à l'optimum pour le courant I_{sc} .

La technique consiste donc à perturber le système en modifiant le rapport cyclique α d'une certaine quantité :

$$\alpha = \alpha + \tilde{\alpha}$$

avec

$$\tilde{\alpha} = \pm \Delta\alpha$$

où $\Delta\alpha$ est une constante.

Puis on regarde l'évolution de I_{sc} : si I_{sc} augmente, c'est que le point optimal n'est pas encore atteint : on ne change pas le sens de variation de α , et $\tilde{\alpha}$ est inchangé.

Si I_{sc} diminue, c'est que le point optimal a été dépassé. Dans ce cas, on inverse la variation de α , et $\tilde{\alpha}$ devient $\tilde{\alpha} = -\tilde{\alpha}$. Cette procédure est bouclée en permanence et s'opère toutes les 100 millisecondes environ afin d'éliminer les transitoires en courant selon un algorithme décrit à la figure 8.

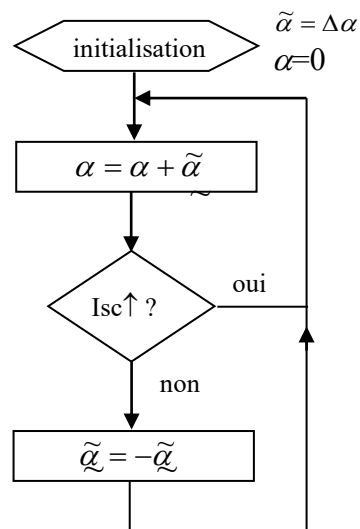


Figure 8 : algorithme du MPPT

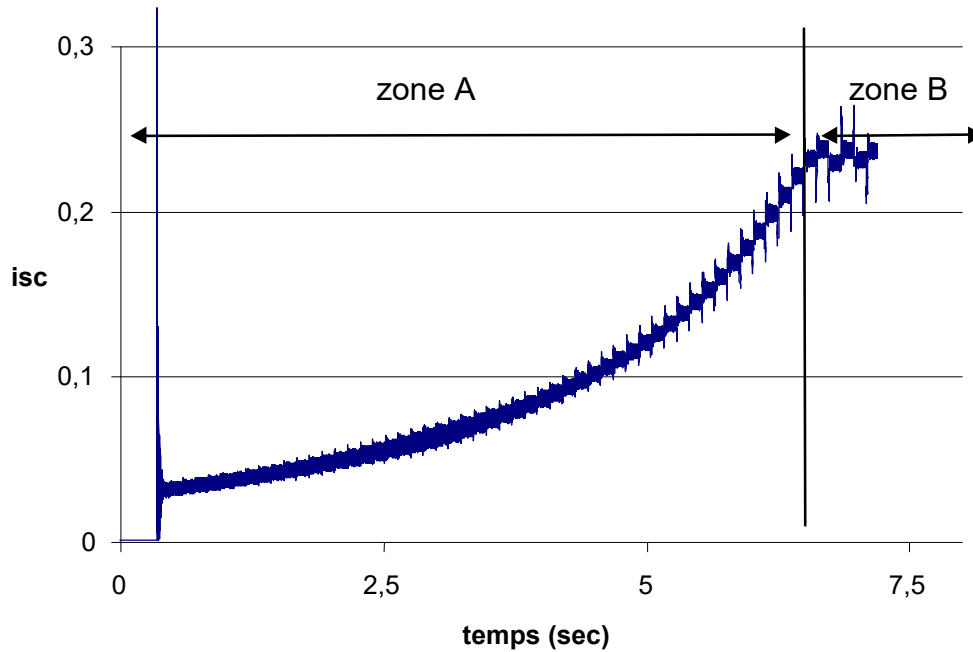


Figure 9 : évolution du courant I_{sc} avec une stratégie MPPT

A titre d'illustration, nous montrons à la figure 9 l'établissement du courant dans la supercapacité en fonction du temps lorsque l'on met sous tension le système à microcontrôleur. Signalons que ce courant est non filtré.

Nous distinguons deux zones:

- une première zone 'A' pendant laquelle le courant dans la supercapacité est toujours en augmentation. C'est la phase de ralliement vers le point à maximum de puissance. Le courant évolue par paliers, imposés par les variations volontaires du rapport cyclique
- une deuxième zone 'B' pendant laquelle le courant évolue autour d'une valeur constante. A chaque fois que le rapport cyclique provoque une décroissance du courant, la stratégie MPPT réadapte sa valeur. Il s'agit du régime permanent.

Ainsi, Il faut environ six secondes au système pour trouver le point à maximum de puissance.

4. Conclusion

Nous avons montré dans cet article une séquence pédagogique utilisant des panneaux solaires. Nous montrons aux étudiants l'intérêt d'une conversion statique de l'énergie pour extraire le maximum de puissance de panneaux photovoltaïques de table. Ils sont amenés à réfléchir sur les transferts de puissance à partir de mesure que nous faisons en cours de séance.

Nous avons également détaillé la réalisation des divers convertisseurs utilisés dans cette séance de travaux pratiques. En particulier, la stratégie MPPT programmée sur un microcontrôleur est illustré par un essai expérimental.

[1] site internet: <http://frederic.giraud.polytech-reseau.net/>

[2] *Development of a Microcontroller-Based, Photovoltaic Maximum Power Point Tracking Control System*, Eftichios Koutroulis, Kostas Kalaitzakis, Member, IEEE, and Nicholas C. Voulgaris, IEEE TRANSACTIONS ON POWER ELECTRONICS, VOL. 16, NO. 1, JANVIER 2001.

Mise en œuvre de régulateurs industriels

Christian SERMONDADE

Lycée La Martinière –Diderot
Lyon

Résumé : Ce second article traite du réglage d'un régulateur industriel PID, en fonction de critères objectifs définis par l'utilisateur. Il fait suite à un premier article paru dans le numéro de Décembre 2009 qui traitait de la structure interne de ce type de régulateur.

1. Introduction

Le réglage des trois coefficients d'un régulateur PID a longtemps été considéré comme « une science divinatoire » où la « pifométrie » avait une part importante, au mépris d'une réflexion scientifique la plus élémentaire. Les principales raisons étaient :

La jeunesse de cette branche de l'Automatique : les premiers régulateurs PID utilisant alors une technologie pneumatique datant de la seconde guerre mondiale.

Les critères de performances recherchés dans les industries de procédés (pétrochimie, agroalimentaire, climatisation..) étaient peu contraignants, par rapport à ceux exigés pour les servomécanismes des industries manufacturières (électronique, mécanique, nucléaire, militaire..).

L'utilisation de régulateurs industriels universels pour la mise en œuvre de travaux pratiques en STS (régulation de température, de pression, de débit...) impose aux enseignants d'aborder cette science avec une rigueur scientifique, laquelle devant comporter les quatre points suivants :

a) Une modélisation fiable du système, en fonction de la nature de la grandeur à régler et des éléments de la boucle de régulation, notamment de l'actionneur.

b) Une prise en compte du mode de fonctionnement de cette boucle :

- régulation de maintien (travail à consigne constante)
et/ou

- asservissement (travail à consigne variable)

c) Une définition précise des performances attendues, qui dépend largement du point précédent et qui fait apparaître la notion de « robustesse ».

d) La connaissance de la structure interne du correcteur, souvent de moins en moins disponible dans les documentations des constructeurs, pour les raisons suivantes :

✓ les utilisateurs « lambda » exigent une mise en œuvre rapide de la boucle de régulation, au mépris d'un

effort scientifique fastidieux qui n'apporte pas toujours les résultats espérés.

✓ les constructeurs ont développé des algorithmes d'autorégulation (selftune ou autotune en anglais) qui fournissent les paramètres des actions proportionnelle, intégrale et dérivée soit disants les mieux adaptés au correcteur mis en œuvre.

2. Modélisation d'un système

De même qu'un pilote de rallye ne conduit au mieux son véhicule que s'il en connaît bien les capacités, un régulateur PID n'assure bien son rôle que si ses trois paramètres de réglage prennent en compte les éléments d'un modèle dynamique du système.

La régulation n'a longtemps été abordée que sous son aspect servomécanismes car les systèmes électroniques ou mécaniques ont l'avantage de pouvoir être modélisés par des **modèles de connaissance**, en utilisant les lois générales de la Physique.

La littérature regorge de modèles polynomiaux de la forme

$$H(p) = \frac{M(p)}{Yr(p)} = \frac{a_n p^n + a_{n-1} p^{n-1} + \dots + a_0}{b_m p^m + b_{m-1} p^{m-1} + \dots + b_0}$$

censés « coller » au mieux au comportement dynamique du procédé. La structure figée de ces systèmes électroniques ou mécaniques permet en plus d'aboutir à des coefficients (a_i, b_j) à peu près fixes : on peut alors développer toute une théorie intellectuellement satisfaisante à base d'équations différentielles à coefficients constants.

Malheureusement l'automatisation des procédés mettant en œuvre les lois de

- la dynamique des fluides

- la thermodynamique

- la cinétique des réactions chimiques....

ne permet plus (sauf à très haut niveau) d'obtenir un modèle de connaissance fiable.

L'utilisateur est contraint d'utiliser un **modèle de comportement** qu'il faut choisir assez simple (peu de paramètres) mais suffisamment fiable et générique pour représenter le maximum de procédés industriels.

Depuis 40 ans le modèle qui tend à s'imposer est le modèle de BROÏDA, assimilant le système à un premier ordre, associé à un retard pur (ou temps mort). La fonction de transfert est donc de la forme :

$$H(p) = \frac{M(p)}{Yr(p)} = \frac{K e^{-Tp}}{1 + \tau p}$$

K gain statique, T temps mort, τ constante de temps

Ce modèle « rustique » est particulièrement bien adapté pour les processus industriels mettant en œuvre des transferts de matière ou d'énergie :

- le temps mort T prend en compte le retard de propagation

- la constante de temps τ traduit le temps de réponse

- le gain statique K devient le seul paramètre fortement variable en fonction des non linéarités liées au point de fonctionnement adopté et de l'actionneur utilisé (vannes non linéaires).

L'identification de ces trois paramètres peut être réalisée par la technique de la réponse indicielle. On trouvera de plus amples informations dans le problème d'automatique de l'agrégation de physique appliquée 2008, site :

<http://www.education.gouv.fr/cid21524/sujets-agregation-externe.html>

et dont le corrigé est disponible dans les pages spéciales du n° 911 (février 2009) du BUP, site :

<http://www.udppc.asso.fr/>

de la page 153 à la page 179.

De façon plus professionnelle, des logiciels d'identification onéreux sont disponibles (on peut citer ceux de l'ADERSA, dont Jacques RICHALET a été directeur).

Une identification avec ce modèle peut paraître universitairement simpliste, mais elle peut déboucher sur la mise en œuvre de correcteurs spécifiques et plus particulièrement les correcteurs prédictifs à modèle interne (abordés dans le même sujet d'agrégation).

Un dernier avantage de ce modèle est d'être « pessimiste ». L'introduction d'un temps mort T rend toujours conditionnelle la stabilité de la boucle. En effet le déphasage $-\omega T$ introduit par le terme e^{-Tp} conduit à des marges de stabilité (marge de gain G_m ou marge de phase φ_m) qui peuvent toujours s'annuler et rendre la boucle instable. Ce phénomène peut se produire sur une augmentation excessive de l'amplification A (le réglage est alors trop dur) mais surtout sur une augmentation du

gain statique K du procédé (voir le problème de la **robustesse** abordé au paragraphe 4 : performances du réglage). Ce modèle pessimiste conduit alors à des performances réelles observées meilleures que celles prédéterminées.

3. Mode(s) de fonctionnement de la boucle

a) régulation de maintien

La consigne W étant constante, les coefficients K , T , τ ont des valeurs quasi fixes et l'adoption des trois paramètres de réglage fixes :

A amplification (ou Xp bande proportionnelle = $A/100$)

Ti temps d'action intégrale

Td temps d'action dérivée

permet d'obtenir un fonctionnement satisfaisant au cours du temps, dont les performances seront fixées par les choix opérés au paragraphe 4.

Ce mode de fonctionnement conduit le plus souvent à adopter un réglage « dur » où les poids des trois actions sont importants. Le réglage de Ziegler et Nichols est l'exemple le plus connu.

b) asservissement

Le fait de travailler avec une consigne variable introduit des points de fonctionnement différents, ce qui influe essentiellement sur le paramètre K .

Trois solutions s'offrent alors :

- adopter un réglage « mou » permettant une « robustesse » satisfaisante, quel que soit le point de fonctionnement.

- utiliser un mode de régulation « autoadaptative », qui recalcule en temps réel une adaptation du réglage (essentiellement l'action proportionnelle).

- utiliser le mode adaptatif du régulateur (présent sur de nombreux régulateurs industriels) qui permet de mettre en mémoire différentes valeurs de réglage et de les appliquer selon le point de fonctionnement. Cette technique nécessite de disposer des variations de K donc d'avoir réalisé plusieurs identifications ou d'avoir relevé quelques caractéristiques statiques $Yr = f(M)$

c) dans le cas d'une utilisation en régulation de maintien ET en asservissement, la nécessité d'obtenir des performances satisfaisantes dans les deux modes pose un dilemme.

Dans la majorité des cas on utilisera un réglage « dur » (d'où l'universalité du réglage de Ziegler et Nichols) tout en atténuant les effets d'un changement de consigne W .

Les dispositifs les plus connus sont toutes les variantes de la neutralisation temporaire de l'action intégrale et l'équilibrage de consigne, abordés dans le 1^{er} article. Une autre technique consiste à utiliser les régulateurs de type RST, mais cette réalisation ne s'est pas généralisée dans le monde des industries de procédé.

4. Performances du réglage

Pendant très longtemps cet aspect a été abordé (à cause des servomécanismes) sous l'unique éclairage du dilemme : précision-stabilité.

L'emploi d'une action intégrant le signal d'écart ε introduit un déphasage de $-\pi/2$ très nuisible à la stabilité, en rapprochant la courbe $T(j\omega) = C(j\omega).H(j\omega)$ du point critique -1, défini par $(1, -\pi)$.

De nos jours les performances attendues (et donc les formules de réglages) doivent plutôt prendre en compte l'aspect **robustesse** de la boucle de réglage. On définit la robustesse comme l'aptitude, pour une boucle de régulation, à conserver des performances satisfaisantes lorsque la fonction de transfert $H(p)$ du système évolue (à réglage fixe du régulateur).

Ces évolutions peuvent être dues à :

- un changement de point de consigne
- une variation de la perturbation principale (typiquement le débit de charge dans un échangeur de chaleur ou un débit de soufflage d'air dans une climatisation)
- une modification des conditions d'utilisation d'un actionneur (typiquement la pression amont d'une vanne vient à fluctuer)

Tous ces phénomènes ne pouvant pas être totalement modélisés, il convient d'adopter un réglage permettant de maintenir stable la boucle, sans intervention d'un opérateur. En effet le plus souvent, lorsqu'une boucle part au « pompage » (c'est-à-dire devient instable), un opérateur passe le régulateur en mode MANUEL et conduit le signal de commande Y_r par l'intermédiaire de son IHM (Interface Homme Machine).

On monopolise alors l'attention d'un intervenant humain, ce qui devient pénalisant en terme de coût. Le régleur (automaticien chargé du réglage des 3 paramètres A, T_i, T_d du régulateur) doit donc AUSSI être un homme de procédé (process man), pour mieux connaître les conditions de fonctionnement de la boucle étudiée.

L'expérience acquise sur des sites industriels devient primordiale et les réglages « pifométriques » des vieux régleurs sont en fait l'agrégation de ses années d'expérience.

Les tableaux de réglage incontournables de :

- Ziegler et Nichols
- Broïda

sont fournis en annexe, en fin d'article.

La méthodologie de choix comporte alors 3 étapes.

- a) faut-il une action dérivée ou non ?
- b) le système a-t-il un gain statique fortement variable ?

c) Si oui, l'exploitant recherche-t-il une bonne robustesse ?

Pour le choix d'une action dérivée, il faut connaître la difficulté de réglage, déterminée par le rapport de réglabilité $r = T/\tau$. On utilise alors l'échelle fournie en annexe.

L'usage d'une action dérivée se justifie essentiellement pour 2 raisons. En régulation, pour anticiper l'action d'une perturbation. En asservissement, pour « adoucir » un réglage un peu dur, produisant des dépassements importants en cas de saut de consigne, lorsque l'équilibrage de consigne n'est pas disponible.

L'action dérivée étant très sensible au bruit (y compris le bruit de quantification du CAN de l'entrée mesure) il convient d'utiliser au mieux le filtrage de l'entrée mesure et de n'adopter pour T_d que des valeurs au maximum inférieures à 1/5 de la valeur de T_i (pour une structure MIXTE du régulateur, voir paragraphe 5) et au plus de 40 secondes. Pour toute valeur supérieure à cette limite, on n'oubliera jamais que la réalisation d'un dérivateur causal implique un filtrage de cet étage, dont la fonction de transfert est donc de la forme :

$$\frac{T_d p}{1 + \tau_f p}$$

où la constante de temps de filtrage τ_f n'est désormais plus accessible sur les régulateurs modernes.

- Si le coefficient K du modèle est peu variable, il convient d'adopter un réglage dur de type Ziegler et Nichols, en permettant son emploi en asservissement par l'utilisation des dispositifs déjà cités. La marge de gain G_m de l'ordre de 6 dB est alors suffisante pour maintenir la stabilité de la boucle.

- Si le coefficient K est susceptible de varier dans certains cas (au plus un doublement de valeur), on peut adopter le réglage plus « mou » de Broïda. L'action intégrale est alors calculée à partir de τ et non plus de T , permettant ainsi d'aboutir à une marge de gain plus confortable, permettant d'amortir l'évolution de K .

- Si K est fortement variable, il convient d'utiliser le réglage de Broïda ET un dispositif d'adaptation de l'action proportionnelle, en fonction des variations **identifiées** de K .

Les calculs de la théorie des asservissements montrent que l'amplification A et le gain statique K apparaissent toujours sous la forme du produit AK , dénommé gain de boucle. Le moyen le plus satisfaisant est alors de travailler à gain de boucle constant $AK = C^{ste}$.



Quelle valeur faut-il adopter pour AK ?

Une des formules les plus astucieuses est d'adapter cette valeur à la difficulté de réglage $r = T / \tau$.

$$(AK)_{\max} = 1,2 (T / \tau)^{-0,8}$$

Terminons avec le cas particulier des systèmes modélisables par une fonction de transfert du 1^{er} ordre, comme par exemple la régulation de vitesse d'un moteur électrique.

D'un point de vue pédagogique il convient de préconiser le réglage PI de Broïda qui a le mérite d'aborder la technique de disparition du pôle dominant (constante de temps mécanique) tout en soulevant le problème d'une mauvaise compensation de ce dernier si la charge du moteur varie. L'utilisation d'un réducteur permet alors d'atténuer ces variations.

5. Les trois structures de correcteur PID

Les tableaux évoqués ci-dessus concernent uniquement la structure MIXTE, la plus répandue pour les régulateurs industriels. Ces correcteurs correspondent à la fonction de transfert idéalisée :

$$C(p) = \frac{Y_r(p)}{\varepsilon(p)} = A.(1 + \frac{1}{T_i p} + T_d p)$$

où le filtrage de l'action dérivée est omis.

Cette structure s'est imposée rapidement avec les réalisations électriques puis électroniques des régulateurs industriels. Elle présente l'inconvénient de réaliser un coefficient d'action intégrale A / T_i qui se modifie lorsqu'on désire ne modifier que le poids A de l'action proportionnelle.

Pour les réalisations plus anciennes (en particulier pneumatique) on utilisait la structure SERIE, dont la fonction de transfert est :

$$C(p) = \frac{Y_r(p)}{\varepsilon(p)} = A.(\alpha + \frac{1}{T_i p} + T_d p)$$

où le coefficient d'interaction vaut :

$$\alpha = 1 + \frac{T_d}{T_i}$$

Si $T_d = 0$, on retrouve la structure PI mixte.

Les réalisations numériques (surtout sur les SNCC) utilisent de plus en plus la structure PARALLELE :

$$C(p) = \frac{Y_r(p)}{\varepsilon(p)} = A + \frac{1}{T_i p} + T_d p$$

que l'on écrit le plus souvent sous la forme :

$$C(p) = \frac{Y_r(p)}{\varepsilon(p)} = K_p + K_i \frac{1}{p} + K_d p$$

Cette structure supprime le couplage des actions P, I et D mais présente 2 inconvénients :

- le coefficient d'action intégrale K_i doit souvent s'exprimer dans une unité « barbare » appelée répétition par minute.

- les tableaux de réglages cités dans cet article ne sont plus utilisables directement : il faut réaliser une transposition du réglage, en identifiant les poids des 3 étages :

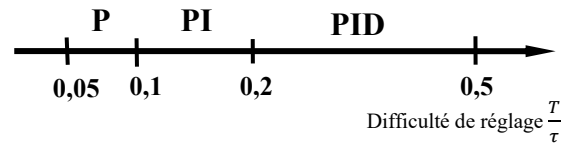
$$K_p + K_i \frac{1}{p} + K_d p = A + \frac{A}{T_i} \frac{1}{p} + A T_d p$$

6. Conclusion :

Ce second article n'a pas la prétention d'être exhaustif, mais de permettre plus facilement la mise en œuvre de TP de régulation en classe de STS. L'utilisation du logiciel SIMPID évoqué dans le 1^{er} article permet de valider les notions précédentes et prépare l'étudiant à se confronter au comportement des régulateurs industriels qu'il mettra en service après son diplôme

Annexe

Choix d'un mode de régulation



Réglages de Ziegler et Nichols

	P	PI	PID
X_p %	100 K $\frac{T}{\tau}$	120 K $\frac{T}{\tau}$	80 K $\frac{T}{\tau}$
T_i		3T	2T
T_d			0,4T

Réglages de Broïda

	P	PI parallèle	PI série/mixte
X_p %	125K $\frac{T}{\tau}$	125K $\frac{T}{\tau}$	125K $\frac{T}{\tau}$
T_i		K $\frac{T}{0,8}$	τ

	PID parallèle	PID mixte	PID série
X_p %	120 K $\frac{T}{\tau + 0,4T}$	120 K $\frac{T}{\tau + 0,4T}$	120 K $\frac{T}{\tau}$
T_i	K $\frac{T}{0,75}$	$\tau + 0,4T$	τ
T_d	$\frac{0,35}{K} \tau$	$\frac{\tau}{2,5\tau + T} T$	0,42T

Découverte d'activités de R&D dans les domaines des machines électriques et de la modélisation électromagnétique

Arnaud BRUGIER

Enseignant de Génie Electrique

Lycée Isaac Newton,

1 place Jules Verne, 92110 Clichy

arnaud.brugier@ac-versailles.fr

Résumé : cet article a pour but de proposer aux collègues de Génie Électrique et de Physique Appliquée une vision actualisée de certaines activités de recherche et développement (R&D) dans les domaines des machines électriques tournantes et de la modélisation/simulation électromagnétique. Il s'appuie sur une expérience d'une année scolaire au sein du département THEMIS de EDF R&D (Clamart, 92) dans le cadre d'un stage long CERPET.

C'est également l'occasion de découvrir différentes façons de mettre en œuvre et d'exploiter un modèle numérique et ce, non pas dans un contexte de conception d'un produit ou d'une installation comme cela est souvent le cas, mais plutôt d'analyse du fonctionnement de l'existant (point de vue maintenance).

Gageons que ces démarches pourront trouver un écho dans nos pratiques lors de l'étude des systèmes techniques industriels.

1. Le CERPET STI

Il s'agit d'un outil d'ingénierie pédagogique qui assure aussi l'interface entre l'Education Nationale et les entreprises.

Le CERPET poursuit et développe son action de formation des enseignants « tout au long de la vie » à partir des :

- stages courts (une semaine) → environ 1600 professeurs volontaires par an sur plus de 200 stages,
- stages longs (une année scolaire) permettant d'intégrer une équipe de projet dans une entreprise,
- stages de découverte professionnelle organisés à l'attention des professeurs de collège en charge d'aider les élèves dans leur projet d'orientation.

Contact : www.cerpnet.education.gouv.fr

2. Le Groupe MEMOS au sein de EDF R&D

2.1. Activités du groupe EDF

Elles sont différenciées de la façon suivante :

- ouvertes à la concurrence : production, commercialisation et négoce d'énergie,
- activités régulées assurées par des filiales : transport (RTE, EDF Transport), distribution (ERDF en France),...

La R&D est le garant scientifique d'EDF. Ses fonctions :

- développement des codes numériques de modélisation et simulation,
- veille technologique internationale,
- aide au choix de matériels,
- anticipation des ruptures technologiques,
- appui de niveau 3 aux autres entités du groupe en cas d'avarie grave (après la Direction Technique Générale (niveau 2) et le service d'ingénierie local du moyen de production (niveau 1)).
- travaux de normalisation internationale (CIGRE) et établissement des normes CEI (Europe), IEEE (Amérique du nord) et ISO (International).
- réponse aux besoins exprimés par les clients (études).

Quelques chiffres (2008) relatifs à la R&D d'EDF :

- 2000 personnes dont 30% de femmes,
- 79% de cadres,
- 300 docteurs et 200 doctorants,
- 200 chercheurs enseignants dans les Universités et les Grandes Ecoles,
- 421 millions d'euros de budget (dont 75% contractualisés avec les branches du groupe et 25% pour la recherche de moyen et long termes)

Chaque année, la R&D organise le Printemps de la Recherche, manifestation ouverte ayant pour but de faire le point sur une problématique d'actualité.



Ex. de thèmes abordés :

- « Demain, les énergies renouvelables » en 2008,
- « Gestion active de la production décentralisée » et « Le stockage d'énergie » en 2009.



2.2. Le département THEMIS (Technologies et Modélisation des Infrastructures du Système Électrique)

Ce département s'intéresse aux grands composants du système électrique nécessaires aux missions du groupe EDF :

- la production (parcs nucléaire, thermique à flamme, hydraulique et ENR),
- le transport,
- la distribution,
- et la commercialisation de l'énergie électrique.

Ses principales productions sont :

- des résultats d'études,
- le développement d'outils logiciels (prototypes, outils industriels),
- la rédaction de spécifications pour les matériels du futur,
- et l'appui en expertise sur les problèmes rencontrés sur le parc existant.

Le département est constitué de trois groupes (une cinquantaine d'ingénieur-e-s-chercheur-se-s (I-C) et technicien-ne-s) :

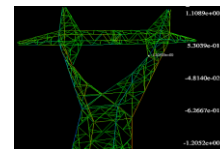
R24 (spécialités :

Transformateurs et Technologies des Réseaux)



R25 (spécialités : Machines Électriques, Modélisation, Outils et Services (MEMOS))

R27 (spécialités : Mécanique et Technologie des Infrastructures du Système Électrique)



2.3. Le groupe MEMOS / Equipe "Machines Electriques" (MEMOS)

Ce groupe cherche à diminuer les coûts d'achat, d'exploitation et de maintenance du parc de machines tournantes électriques :

- moteurs BT et HT,
- alternateurs (hydraulique, éolien),
- et turboalternateurs (nucléaire et thermique à flamme),

à l'aide de politiques, technologies, méthodes et outils nouveaux.

Pour cela, les I-C (ingénieur-e-s-chercheur-se-s) :

- aident à la qualification des nouvelles machines,
- aident au diagnostic et à la surveillance des machines en exploitation,
- développent des outils de diagnostic et d'expertise de ces machines, notamment en utilisant des modèles permettant de simuler des conditions d'exploitation particulières et d'en apprécier les conséquences sur les constituants.

2.4. Le groupe MEMOS / Equipe "Modélisation Electromagnétique" (MEMOS)

Les I-C développent et utilisent des modèles :

- analytiques,
- analogiques (modélisation par circuits équivalents utilisée pour les études des grandeurs globales électromagnétiques, électriques et thermiques (Cf. outil « EMTP »)),
- et surtout numériques par éléments finis 2D & 3D. Ces modèles sont conçus en appui d'études sur :
 - les matériels électriques (moteurs, alternateurs, transformateurs),
 - et les sondes permettant d'effectuer du contrôle non destructif (CND) pour des applications nucléaires.

2.5. Le groupe MEMOS / Equipe "Outils et Services" (MEMOS)

En appui à la branche « commerce » d'EDF, les I.-C. développent des offres de services d'éco-efficacité énergétique aux clients, passant notamment par une meilleure utilisation des moteurs dans l'industrie :

- création d'outils de (pré-)diagnostic énergétique,
- optimisation d'installation,
- recherche de solutions techniques pour la télémessure sur site...

2.6. Le LEME (Laboratoire d'Essai des Matériels Électriques)

Il permet d'effectuer des essais dans les domaines des machines électriques tournantes, de l'électronique de puissance, de l'électronique d'acquisition, des bornes de recharge des véhicules électriques et de la compatibilité électromagnétique.

Le LEME est principalement équipé de 4 bancs d'essais de machines tournantes basse tension et d'un banc d'essai et de couplage au réseau d'une maquette de turbo-alternateur (Cf. Figure 1).



Figure 1 : vues de deux bancs d'essai pour moteur BT (à gauche) et de la maquette de turboalternateur (à droite) au LEME, à Clamart (92).

2.7. Le LAMEL (Laboratoire de Modélisation Electromagnétique)

Il s'agit d'une entité commune créée en janvier 2006 par le département THEMIS en partenariat avec le L2EP (Laboratoire d'Electrotechnique et d'Electronique de Puissance) de l'Université de Lille visant à devenir un pôle d'excellence dans le domaine du calcul de champ électromagnétique.

3. Les outils de modélisation électromagnétique

3.1. Expression du besoin

Le fort développement des codes de calculs par éléments finis chez EDF R&D s'explique par :

- la nécessité d'interconnexion des différentes disciplines sur un même projet : mécanique, mécanique des fluides, thermique, électromagnétisme... afin de résoudre des problèmes bien plus complexes,
- la nécessité de « voir » ce qu'il se passe à n'importe quel endroit de la machine étudiée,
- l'arrivée d'une nouvelle génération d'ingénieurs sensibilisée à l'utilisation de tels outils.

Cependant, les codes de calculs par éléments finis (EF) du commerce ne permettent pas toujours de satisfaire certains besoins spécifiques énoncés par l'ingénierie d'EDF :

- prise en compte de géométries complexes (têtes de bobines des turbo-alternateurs, ...),
- étude de machines particulières,

- recherche de signatures de défauts dans des cas de fonctionnements particuliers,
 - étude de régimes de fonctionnement transitoires, prise en compte de certaines conditions...
- d'où un fort besoin d'outils spécifiques, adaptés et adaptables à ces travaux.

3.2. Modélisation volumique et maillage avec la plate-forme SALOME



<http://www.salome-platform.org>

Version 5 issue d'un co-développement entre le CEA et EDF.

Cet environnement logiciel est :

- une plate-forme d'intégration de pré et post traitement, avec couplage de codes pour la simulation numérique, qui vise à faciliter l'interopérabilité entre la modélisation CAO et différents solveurs,
- un moyen d'essai « virtuel » fonctionnant dans un environnement LINUX,
- un outil qui favorise, au sein de la R&D d'EDF, le travail coopératif entre les différents groupes de spécialités (métiers).

Principales caractéristiques :

- importation/exportation, réparation/nettoyage et création/modification de géométries (avec l'interface graphique ou la console (langage « Python »)),
- maillage des éléments géométriques, contrôle de la qualité du maillage, importation et exportation de maillage (avec l'interface graphique ou la console (langage « Python »)),
- manipulation des propriétés physiques ou numériques des éléments géométriques,
- lancement des calculs via un code dédié : entrée des données, configuration du code de calcul, sorties du champ des résultats,
- mise en oeuvre du chaînage/couplage entre les codes de calculs grâce à un format d'échange de données (champs, géométries, maillages...) commun (fichiers .MED),
- post-traitement et visualisation des résultats.



Figure 2 : organisation de la plateforme SALOME

3.3. Code CARMEL_3D : pour le calcul électromagnétique

EDF R&D a eu accès au code CARMEL dans le cadre du LAMEL créé avec l'Université de Lille.

Les deux partenaires s'emploient depuis deux ans à le réécrire (Natacha Béreux, I.-C., responsable du développement de Code Carmel côté EdF) et à le faire progresser, avec notamment la sortie d'une version « fréquentielle », adaptée aux applications à fréquence fixe (CND, calculs des pertes par effet Joule, ...), et d'une version temporelle (machines tournantes, transitoires...).

Code_Carmel_3D est un outil de calcul du champ électromagnétique par une méthode d'éléments finis 3D :

- basée sur la résolution des équations de Maxwell dans le cadre de l'Approximation des Régimes Quasi-Stationnaires (ARQS),
- utilisant 2 formulations en potentiels : « A-Φ » et « T-Ω »,
- exploitant des éléments finis volumiques.

Après la construction d'un modèle géométrique :

- définition de la géométrie (modeleur volumique) de la machine avec un arbre de construction,
 - maillage renseigné du domaine et création de groupes d'éléments et de noeuds, nommés selon une convention systématique,
- les calculs sont effectués de façon séquentielle (exécutables différents) par 3 exécutables (Cf. fig. 3) :
- « Gendof » : crée un modèle éléments finis,
 - « Genphys » et « Genparam » : permettent l'entrée des données (physiques et numériques),
 - « FCarmel » : assemble un système linéaire et le résoud,
 - « Postprocess » : construit le(s) résultat(s) pertinents pour l'étude.

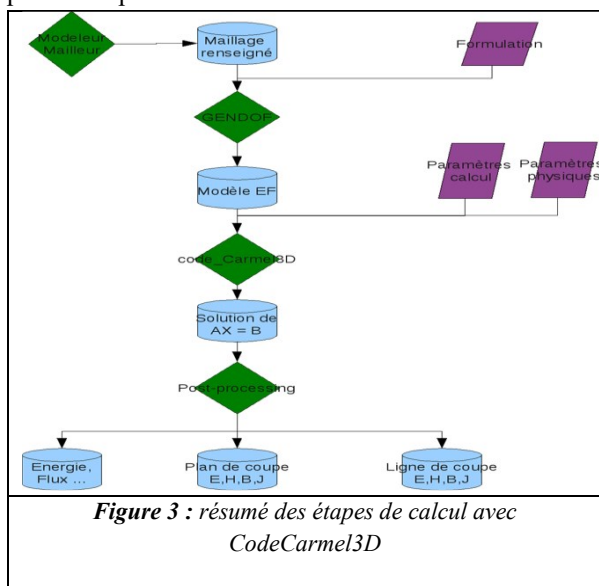


Figure 3 : résumé des étapes de calcul avec CodeCarmel3D

Le Code CARMEL_3D étant encore en développement, il est nécessaire d'en valider le bon fonctionnement dans le cadre du type d'études qui sont principalement réalisées par le département THEMIS. Nous nous attacherons à présenter par la suite les démarches mises en œuvre dans le cadre d'études conduites avec la plateforme SALOME et Code_CARMEL_3D et ayant trait aux domaines du contrôle non destructif (cas tests théoriques ou réels) et des alternateurs.

4. Application à l'étude de cas de contrôle non destructif (CND)

4.1. Etudes de validation du Code_Carmel_3D pour les applications de CND (V. Costan, I.-C. et A. Brugier)

Cas 1 (cas test théorique) : une sonde (bobine) est alimentée et se déplace à la surface d'un matériau qui peut-être recouvert d'une fine couche parasite, de conductivité différente, qu'il s'agit de caractériser.

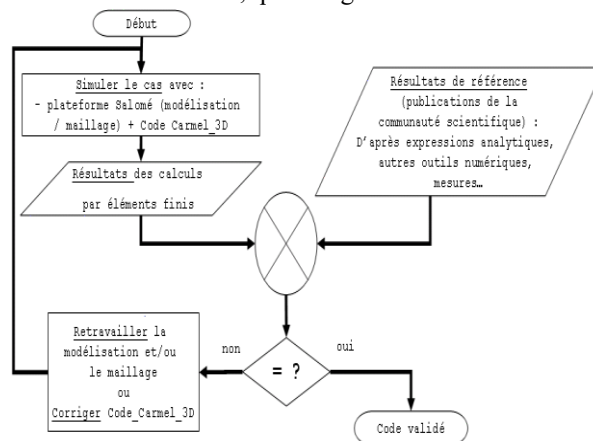


Figure 4 : démarche de validation de Code_Carmel_3D pour le cas 1

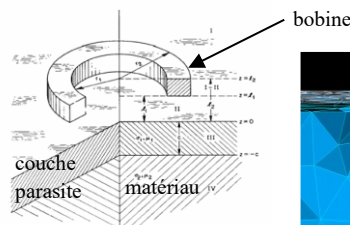


Figure 5 : schéma du cas de référence (Publication de Dodd and Deeds)

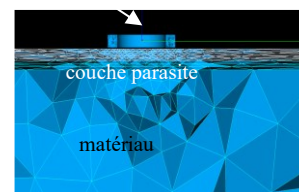


Figure 6 : coupe du maillage effectué sur la géométrie avec SALOME. Les éléments sont volontairement de plus en plus gros à mesure que l'on s'éloigne de la zone de travail du capteur (moins d'intérêt)

Plusieurs simulations sont effectuées avec une épaisseur de couche du matériau parasite différente.

L'écriture d'un script en langage « Python » joué dans la console de SALOME permet d'automatiser toutes les tâches liées au maillage, à l'entrée des données physiques et numériques, au lancement des exécutable de Code_Carmel_3D, au stockage et à l'exploitation des résultats... et ce, pour chaque épaisseur de la couche.

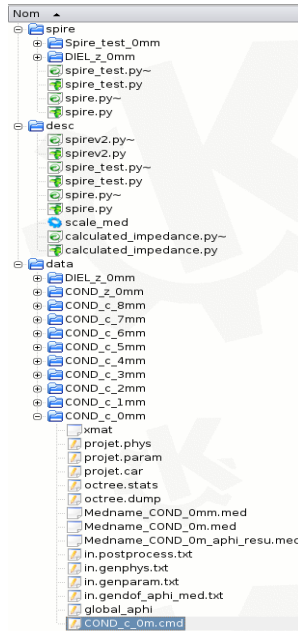


Figure 7 : structure des répertoires contenant les fichiers de simulation pour différentes épaisseurs de la couche

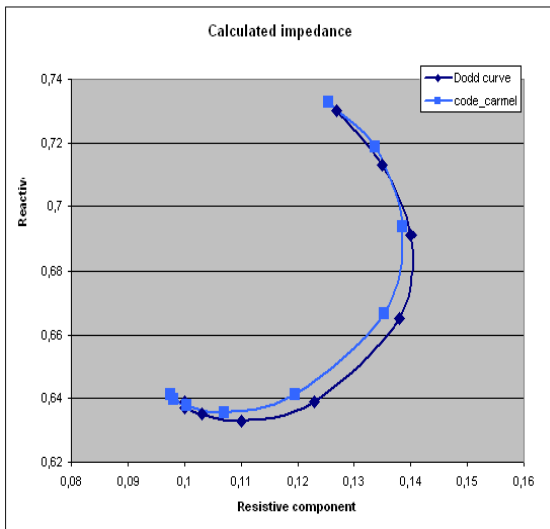


Figure 8 : comparaison des résultats obtenus avec SALOME et Code_Carmel_3D à ceux de la formulation analytique de Dodd and Deeds, pour différentes épaisseurs de couche.

Les résultats obtenus sont très proches de ceux de la formulation analytique de référence (Publication de Dodd and Deeds).

Cas 2 (lié à un projet pour le producteur nucléaire) :

Client : CEIDRE (Comité d'Expertise et d'Inspection dans les Domaines de la Réalisation et de l'Exploitation).

Contexte : inspection des tubes des générateurs de vapeur (GV) des centrales.

Objectifs : l'outil de simulation devait permettre de déterminer les performances d'une nouvelle sonde censée améliorer la détection de certains défauts (fissure), notamment dans le cas de l'apparition d'un dépôt d'une fine couche de cuivre lors des opérations de nettoyage, masquant ainsi ces derniers.

Cette application se rapproche du cas test théorique (Cf. cas 1).

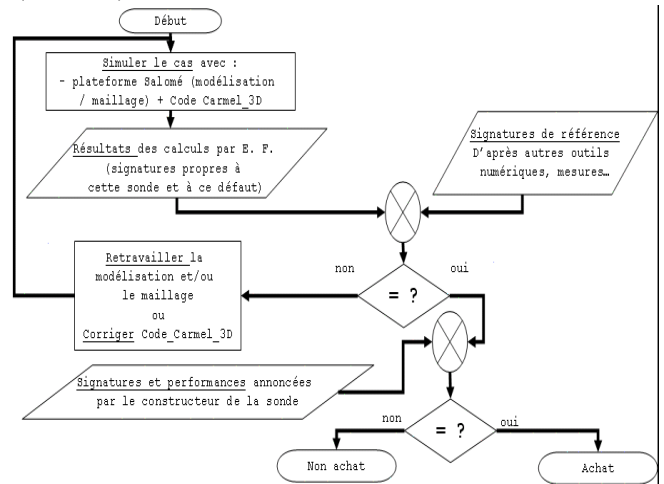


Figure 9 : démarche de validation de la sonde et de Code_Carmel_3D pour des applications de CND

Modélisation et maillage :

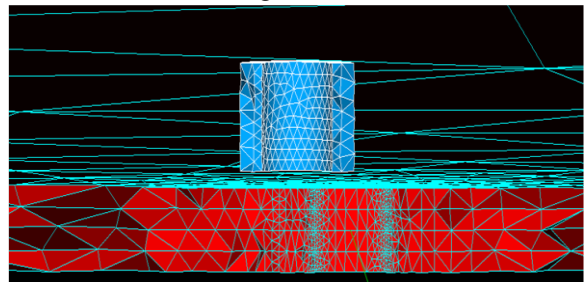
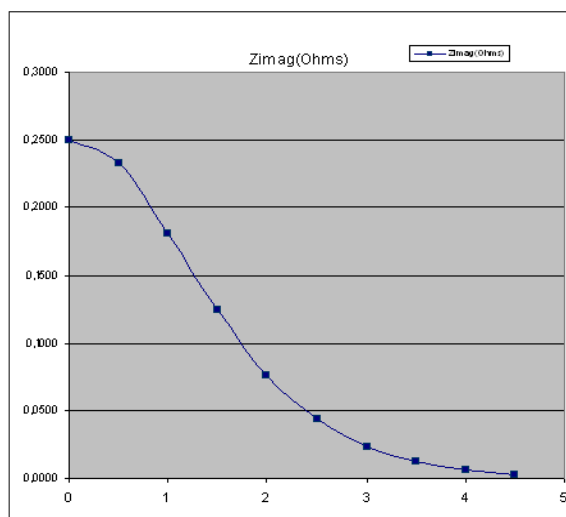
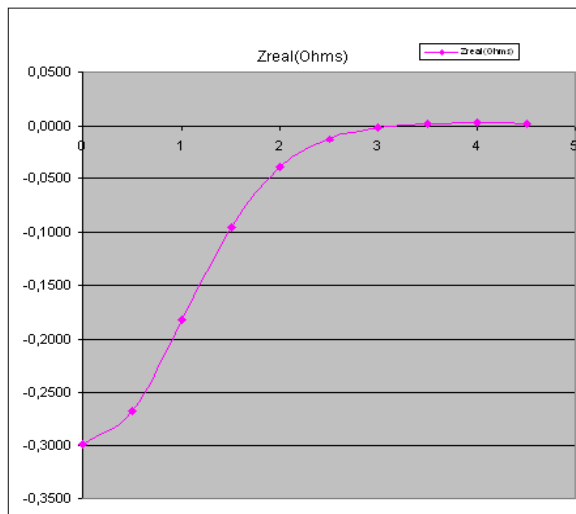


Figure 10 : coupe du modèle 3D maillé. Défaut traversant (fissure) dans le matériau du tube.

Signatures de la sonde sur le défaut de référence :



Figures 11 : résultats des calculs de l'évolution de l'impédance fonction de la position du capteur

Cas 3 (Cas réel mais « expérimentation virtuelle », N. Ida, Distinguished Professor (Akron University) et V. Costan, I.-C.) :

Contexte : un dépôt de magnétite se produit entre les tubes ($\Phi=25\text{mm}$) des échangeurs des générateurs de vapeur et leurs supports mécaniques (entretoises).

Objectifs : détecter et caractériser le dépôt de magnétite / la magnétite (\rightarrow c'est à dire trouver ses propriétés (perméabilité et conductivité)).

Principe de l'expérimentation virtuelle : mesures des « courants de Foucault » avec une sonde en mode différentiel (100kHz) :

- la sonde est constituée de deux bobines émettrices, identiques, alimentées en courant,
- les tensions induites aux bornes des deux bobines sont mesurées,
- la différence entre les deux tensions induites est normalisée par rapport à un défaut étalon du tube,

- la différence normalisée est tracée sous la forme d'un Lissajous.



Figure 12 : tubes GV avec plaque entretoise quadrifoliée



Figure 13 : colmatage entre le tube et la plaque entretoise

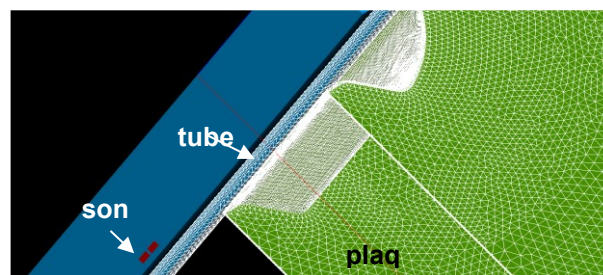


Figure 14 : modélisation et maillage avec Salomé pour simulations avec Code_CARMEL-3D

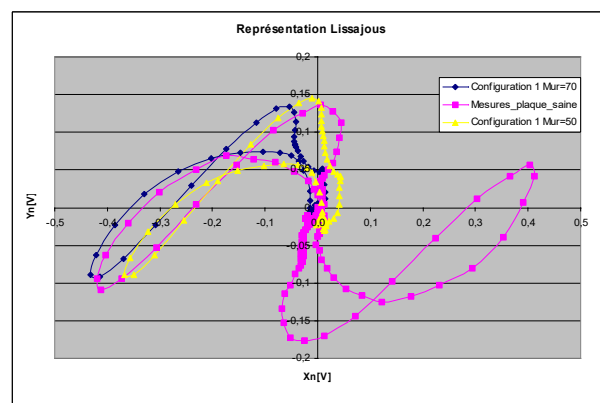


Figure 15 : exemple de courbes Lissajous pour une plaque saine obtenues avec Code_CARMEL-3D (simulations effectuées pour deux valeurs de conductivité (μ_r) de la plaque entretoise)

Exploitation : si les résultats des simulations pour une plaque saine sont cohérents avec les mesures sur maquette, d'autres calculs seront lancés pour caractériser les courbes de Lissajous correspondantes à différents montages du colmatage (bouchage de l'espace entre le tube et la plaque de 0 à 100% avec de la magnétite).

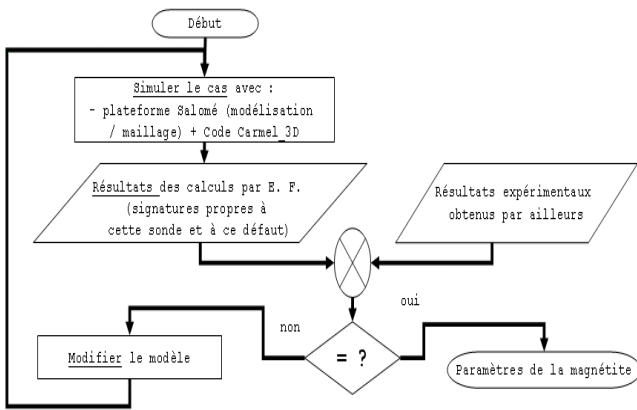


Figure 16 : démarche originale d'utilisation de l'outil de modélisation/simulation : démarche « inverse ». Permet également la validation de Code_Carmel_3D pour des applications de CND.

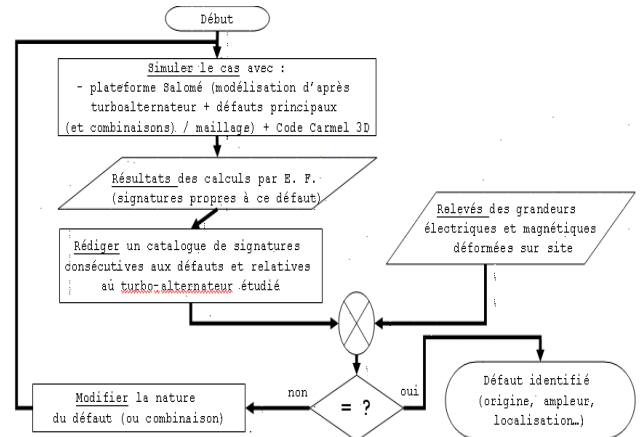


Figure 17 : démarche des études

5. Application à l'étude des alternateurs et turbo-alternateurs

5.1. Surveillance du fonctionnement des machines

Objectifs :

- améliorer le diagnostic des turboalternateurs d'un parc qui arrive aujourd'hui à 30 ans (900MW) et 20 ans (1300MW) de durée de vie.
- les centrales sont en grande partie amorties mais leur exploitation, qu'EdF souhaite prolonger à 60 ans, nécessite de grosses opérations de maintenance.

Le principal projet sur lequel intervient l'équipe « Machines Electriques », très orienté « maintenance », est décomposé en plusieurs lots, répartis entre les différents I-C :

- lot « rotor en défaut »,
- lot « diodes tournantes »,
- lot « dégradation non mécanique du circuit magnétique »,
- lot « cage de développantes »,
- lot « dégradation mécanique du circuit magnétique »,
- lot « nouvelle surveillance »,

D'une manière générale, les actions liées au projet visent à aider les exploitants à détecter et surtout à interpréter, à l'aide des sondes implantées dans les machines, différents types de défauts pouvant se présenter.

Les mesures sur site permettent de détecter les défauts rotors de types : courts-circuits entre spires, excentricité du rotor, ... Pour cela, sont utilisées :

- des sondes de flux dans les T.-A.,
- ou une spire d'entrefer pour les alternateurs à pôles saillants du parc hydraulique et positionnée axialement sur toute la longueur de l'entrefer.

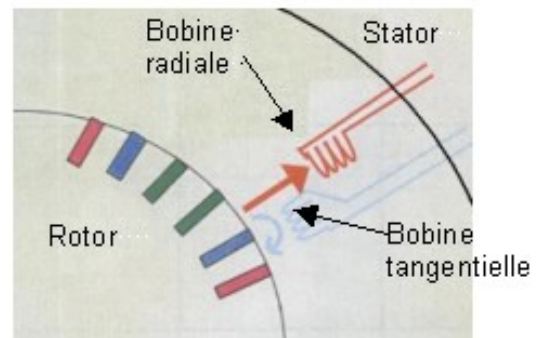


Figure 18 : principe de la sonde de flux

Les conséquences de défauts tels que les courts-circuits entre spires rotor sont des échauffements locaux, des vibrations pouvant dégénérer en masse rotor ou conduire à une limitation de l'exploitation de la tranche (avec des risques d'avarie de la machine).

5.2. Maquette d'essai au LEME

EDF R&D a conçu une maquette de T.-A. permettant de mesurer certains phénomènes électromagnétiques propres à ces machines.

Cette maquette d'essai (P=25kW), représentative d'un T.-A. du parc nucléaire (4 pôles, P=900MW), a été rénovée en 2009 (LEME).

Elle répond à la difficulté d'obtenir des informations / relevés liés à un fonctionnement particulier du T.-A. sur site et surtout au besoin de valider expérimentalement les simulations numériques.

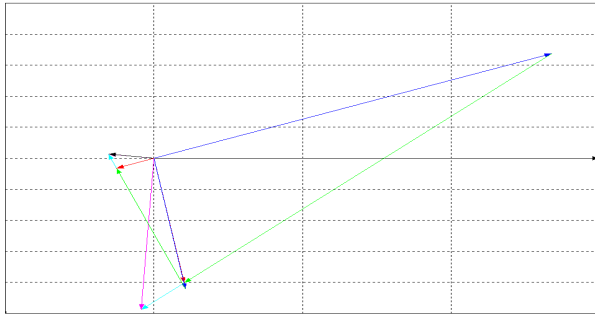


Figure 21 : vues de l'application sous Scilab® dans le cas de la modélisation (Potier) d'un T.-A. 900MW : fichiers / résultats numériques / formes d'ondes / diagramme temporel. Le même travail a été mené sur la maquette.

Les méthodes analytiques utilisées sont adaptées à des cas où les géométries sont simples et où la saturation des circuits magnétiques n'est pas prise en compte.

Cependant, dans la réalité, l'étude des têtes de bobines aux extrémités d'une machine est complexe :

- les conducteurs se développent dans l'air et dans les trois plans et on ne peut faire aucune hypothèse quant à la répartition spatiale de l'induction à leur voisinage,
- il faut tenir compte de la mutuelle inductance entre phases ou bobines voisines,
- le voisinage du fer de l'induit et des peignes en métal massif viennent modifier les courbes de répartition du champ magnétique des conducteurs.

D'où les hypothèses simplificatrices qui impliquent:

- plusieurs expressions dans la littérature, plus ou moins précises,
- chacune applicable pour un type particulier de bobinage.

Ainsi, si une précision importante est recherchée :

- calcul des pertes dans les parties frontales
 - calcul des efforts sur les développantes des enroulements des grands alternateurs, ...
- les valeurs obtenues ne suffisent plus et la méthode de calcul par éléments finis en 3D s'impose.

5.3.2. Modélisation par éléments finis (géométrie)

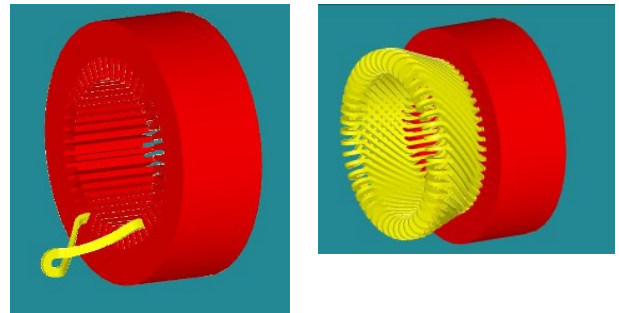


Figure 22 : vues de la modélisation géométrique de la maquette effectuée avec la plateforme SALOME® : de une développante (vue de gauche) à la cage entière (vue de droite) en sortie du circuit magnétique. Chaque développante est divisée en 14 morceaux. Le stator compte 48 encoches.

5.3.3. Modélisation par éléments finis (maillage)

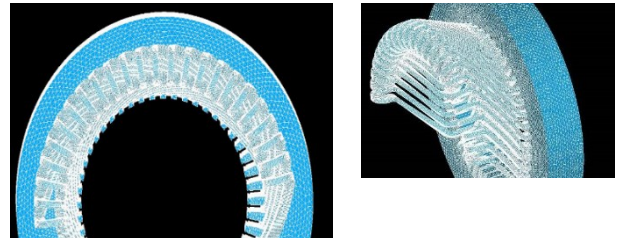


Figure 23 : vues du maillage des têtes de bobines de la maquette effectué avec la plateforme SALOME®. Sont maillées ici une partie des développantes ainsi que la fin du circuit magnétique.

L'outil Code_Carmel_3D va maintenant permettre de calculer le champ magnétique (H) lorsque l'on impose un courant dans certains domaines.

5.3.4. Modélisation par éléments finis (calcul de champs)

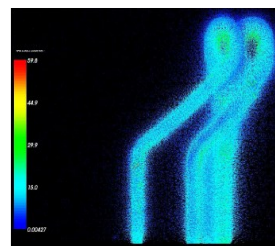


Figure 24 : vues des résultats des calculs de champ (H) effectués avec Code_CARMEL_3D® sur deux développantes seules et visualisés à l'aide du post-processeur de SALOME®.

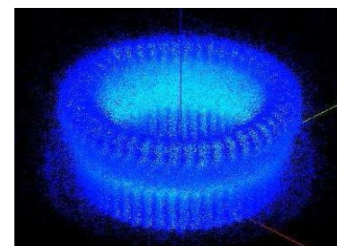


Figure 25 : vue des résultats des calculs de répartition du champ (H) effectués avec Code_CARMEL_3D® sur la cage de développantes en bout de circuit magnétique (présent). Visualisation à l'aide du post-processeur de SALOME®.

Pour réaliser ce test (Cf. figure 26) il a fallu lancer le script pendant 48h pour générer la géométrie et le maillage (4000000 d'éléments). On observe que le champ magnétique est uniformément réparti.

5.3.5. Modélisation par éléments finis (calcul d'efforts)

Les phénomènes électromagnétiques se produisant dans la région des extrémités des têtes de bobines jouent un rôle très important sur le fonctionnement des T.-A. et leur durée de vie.

Ce sont des phénomènes très complexes car les courants ont une répartition tridimensionnelle et sont entourés de régions conductrices et ferromagnétiques.

L'évaluation des forces électromagnétiques de Laplace permettra ensuite d'estimer, dans le domaine mécanique, les efforts subis par le bobinage entraînant des vibrations et la dégradation de certains matériaux.

La connaissance des forces de Laplace constitue un enjeu important pour l'étude des vibrations des cages de développantes qui entraînent des dysfonctionnements importants.

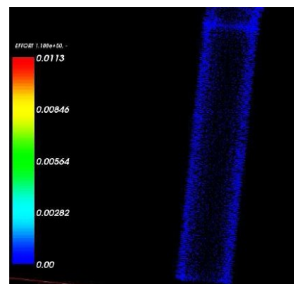


Figure 26 : vue des forces de Laplace s'appliquant sur la partie droite d'une développante (pas de circuit magnétique)

Ainsi, à partir des résultats expérimentaux obtenus sur la maquette, des résultats obtenus à partir des formulations analytiques (en tenant compte des hypothèses simplificatrices associées), il est possible de valider les résultats obtenus avec le modèle numérique de la maquette et donc le code de calcul utilisé.

5.4. Etude de validation du Code_Carmel_3D pour le parc hydraulique (Eilin Guillot, I-C)

L'étude présentée ici a pour support la centrale hydraulique de La Coche, située dans les Alpes, près de Moutiers. Cette centrale est de type « STEP ».

Les Stations de Transfert d'Énergie par Pompage (STEP) se composent d'un bassin amont et d'un bassin aval, naturels ou artificiels. En période de faible consommation, l'eau est remontée par pompage de l'aval vers l'amont pour constituer un stock (énergie potentielle). Grand'Maison dans l'Isère est la plus importante de ce type en France.

Leur vocation : re-stocker de l'eau pour faire face très rapidement aux pointes de la demande.

Objectif : valider les codes utilisés par comparaison des résultats obtenus avec deux codes et deux alternateurs. Partenariat avec l'IREQ (R&D d'Hydro-Québec).

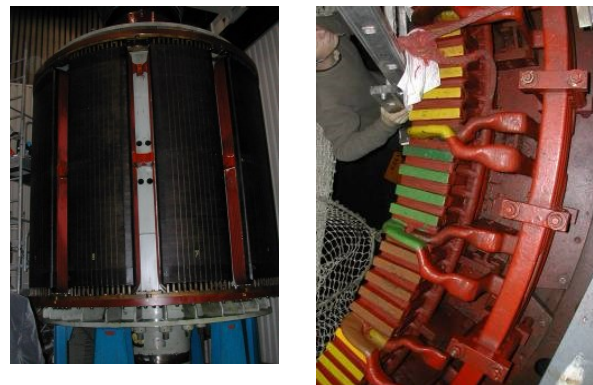


Figure 27 : photos du rotor à pôles saillants (à gauche) et du stator (à droite) de l'alternateur de la centrale de La Coche (alternateur étudié côté EdF R&D)

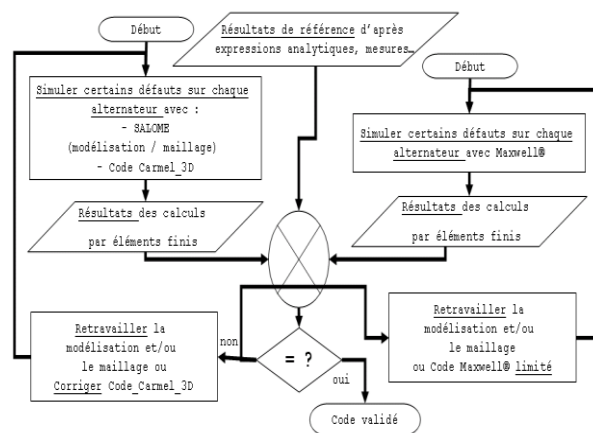


Figure 28: résumé de la démarche de validation du Code_Carmel_3D par comparaison avec le code Maxwell®

Modélisation et simulation sous la plateforme SALOME + Code_Carmel_3D :

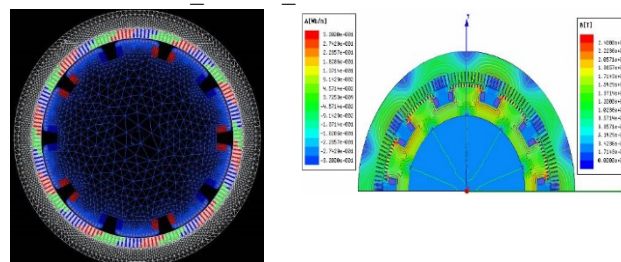


Figure 29 : vues 2D – maillage / densité et lignes de flux - du stator et du rotor de l'alternateur de la centrale de La Coche

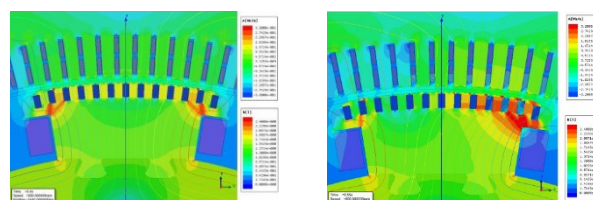


Figure 30 : vues 2D – densité et lignes de flux (à vide à gauche / en charge nominale à droite – Zoom sur un pôle et une partie du stator de l'alternateur de la centrale de La Coche (environnement Salome®)

5.5. Etude de cas dans le parc thermique (M. Biet, I-C)

La centrale thermique est située à Aramon dans le Gard. Elle est constituée de deux unités de production électrique, d'une puissance de 700 MW chacune, mises en service en 1977.

Elle répond aux besoins d'électricité de pointe et donc aux variations de consommation électrique.

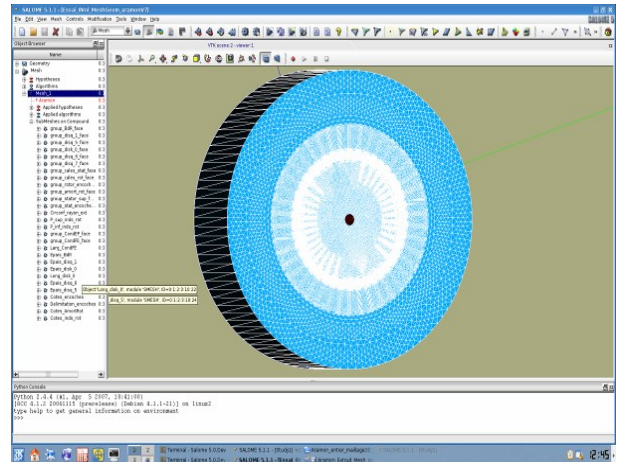
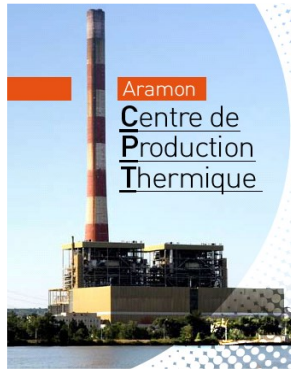
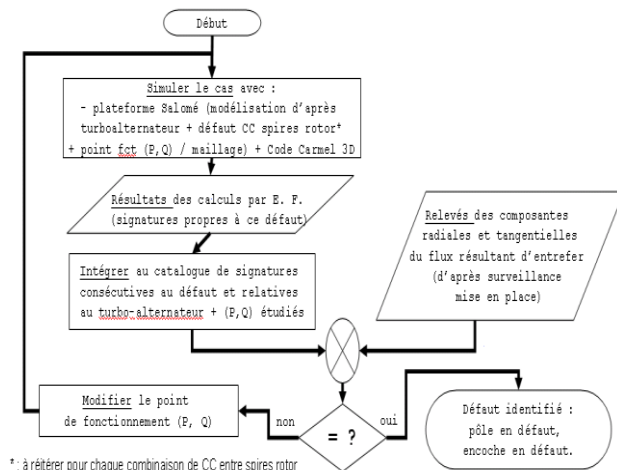


Figure 32: vues 3D (2D extrudé) et maillage de l'alternateur 700MW d'Aramon (Salomé®)

Contexte de l'étude : un défaut de masse rotor est suspecté d'avoir pour origine un court-circuit entre spires du rotor.

Objectifs : produire des signatures relatives à ce type de défaut, pour plusieurs points de fonctionnement, afin d'aider l'exploitant dans son analyse.



* : à répéter pour chaque combinaison de CC entre spires rotor

Figure 31 : résumé de la démarche

Données de départ :

- dossier d'identification de la machine (caractéristiques, quelques plans mécaniques et électriques, ...),
- le témoignage de l'exploitant suite à une avarie.

L'outil de simulation peut réaliser ces signatures dans le cadre d'hypothèses précises.

Ex : c'est un modèle 2D du T.-A. qui a été conçu dans ce cas et cette modélisation implique donc que toute la spire sera considérée en court-circuit et non pas seulement une portion comme cela peut se produire dans la réalité.

Améliorations possibles avec un modèle 3D :

- raisons d'un point chaud aux extrémités du circuit magnétique : prise en compte de la modification de la géométrie du circuit magnétique à cet endroit ainsi que des développantes.
- couplage à un code magnétothermique : cartographie des échauffements dans la machine.
- intégration d'un modèle de mécanique des fluides pour tenir compte du refroidissement et comparaison du tout avec les résultats de mesures.

6. Conclusions

Nous venons de voir, au cours de ce rapide aperçu de quelques activités menées par le groupe MEMOS, que l'outil de modélisation et de simulation numérique par éléments finis est au cœur du processus d'analyse des phénomènes se produisant dans les machines électriques.

Bien que très souvent utilisé dans une démarche de validation de solutions techniques dans la phase de conception, on peut donc aussi le retrouver dans le domaine de l'analyse de l'existant, par exemple chez un exploitant de machines électriques tel qu'EDF.

Ce dernier souhaite garder un haut niveau d'expertise sur ses équipements afin de confronter ses avis à ceux des constructeurs et être en mesure de comprendre les différents événements se produisant sur son parc. Il va même jusqu'à développer ses propres codes de calculs afin de les adapter à ses différents métiers et sujets d'étude mais aussi pour être en mesure d'interpréter, en connaissance de cause, les résultats obtenus.

Ce développement de code numérique passe toutefois par des phases de validation qui nécessitent la confrontation des résultats obtenus avec ceux issus :

- de la mesure sur site lorsque c'est possible. On peut difficilement obtenir, en temps en en heure, les résultats propres à un mode particulier de fonctionnement lorsque la centrale produit et est raccordée au réseau,
- de la mesure en laboratoire. C'est le cas notamment avec la maquette représentative d'un turboalternateur 900MW présente au LEME,
- de résultats issus de formulations analytiques connues,
- de résultats issus d'autres codes de calculs par éléments finis (commerciaux, versions antérieures...)

La grande difficulté dans ce travail étant de tenir compte dans les comparaisons des limitations et hypothèses simplificatrices propres à chaque outil ou méthode.

Une fois le code validé, il peut s'affranchir un peu plus de la confrontation systématique et devenir un réel moyen d'essai virtuel : la maquette numérique.

7. Bibliographie

- P. Géraldo (EDF R&D) et H. Yahoui (CEGELY), «Diagnostic et surveillance des turboalternateurs de centrale nucléaire», Journal sur l'enseignement des sciences et technologies de l'information et des systèmes, Volume 4, Hors-Série 4, 2 (2005)

- Patrick Géraldo, Eilin Guillot, notes H-R15-2006-03713-FR et H-R15-2006-04023-FR, EDF R&D

- Jérémie Foulon, « Modélisation électromagnétique des développantes et du circuit magnétique de turboalternateurs », rapport de stage EDF R&D, R25, 2009

- Jean-Pierre Ducreux, « Calcul des impédances de têtes de bobines de machines asynchrones à partir de *Flux3D* », collection « Notes internes » DER EDF,

- Jean-Pierre Ducreux, Stéphanie Richard, « Etudes de conception d'un modèle expérimental pour valider le calcul électromagnétique des parties frontales d'alternateur », collection « Notes internes » DER EDF,

- Christian Caremoli (EDF R&D) et Laurent DADA (CEA DEN), « Diaporama de présentation de la plateforme SALOME : A generic development platform for pre/post processing and code coupling for numerical simulation »

- N. Béreux, « code Carmel3D, mise en oeuvre de la version 1.0 », Publication EDF R&D, 2008 + Diaporama « QuickStart Code_Carmel3D » EDF R&D

- Plaquette EDF R&D 2008 – un an de réussites. EDF.

- Plaquette « Aramon, centre de production thermique », EDF

- Diaporama «Préparer l'avenir et gérer les crises des grands composants du système électrique», EDF R&D – THEMIS

- Différents articles des « techniques de l'ingénieurs » traitant des alternateurs, des machines synchrones et du calcul des inductances de fuites.

8. Compléments

Le dossier détaillé à l'origine de cet article ainsi qu'un diaporama de présentation sont disponibles pour consultation et téléchargement sur le site du CERPET : www.cerpet.education.gouv.fr, rubrique productions / ressources.

De la spécification à la programmation

Daniel GUYONVARCH

Professeur, Lycée Louis Bascan Rambouillet

Résumé : Cet article présente une utilisation du langage Grafcet (norme CEI 60848) à travers tout d'abord la spécification suivie de la conception détaillée puis le passage à la réalisation programmée de la partie commande d'une partie d'un système industriel. La spécification comportementale balaye progressivement divers objectifs de modélisation : procédé, processus et commande des préactionneurs puis intégration de la prise en compte de la technologie de la commande programmée, ainsi que les contraintes liées aux modes de marche et d'arrêt.

1. Présentation du système support

Sur une chaîne de fabrication de circuits imprimés, afin de réguler les flux de production liés à des indisponibilités de machines situées en aval, un système de stockage permet de ranger en rack au format 19'' (Figure 1), 50 circuits puis les restituer à la demande dans l'ordre d'arrivée (FIFO). Sachant que la cadence amont est de 1 CI toutes les 40s, une 1/2 h de production peut être ainsi stockée. Si la non disponibilité se prolonge, il est possible de charger et décharger manuellement les racks et ainsi ne pas arrêter les machines en amont.



Figure 1 : Rack avec circuits stockés

Dans le cadre d'un projet de BTS MAI, un système similaire a été réalisée avec un format réduit des circuits imprimés (100 x 150).

Pour bien comprendre les évolutions successives de la spécification, il faut se placer dans le contexte d'ingénierie simultanée où la conception de la partie opérative et celle de la partie commande se font simultanément, les informations et les solutions retenues s'échangeant au fur et à mesure de l'avancement du projet. Les descriptions comportementales ainsi

obtenues permettent aux lecteurs de s'appropriier progressivement la spécification, sans entrer immédiatement dans un niveau de détail inutile. Elle facilite également le dialogue entre le concepteur et le client final.

2. Description de la commande du procédé

A partir des fonctions données par le bureau d'étude et décrites par un diagramme FAST (Figure 2) et un schéma de principe (Figure 3), le concepteur de la partie commande décrit le comportement de la commande du procédé après avoir associé un repère de tâche à chacune des 4 fonctions de la figure 2.

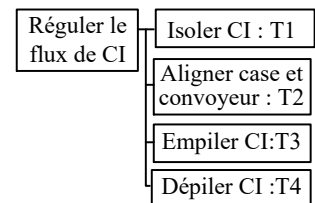


Figure 2 : FAST Procédé

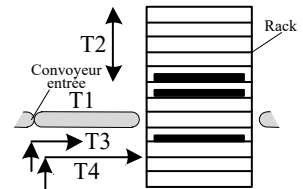


Figure 3 : Schéma de principe

Le convoyeur d'entrée ayant une marche continue, un convoyeur supplémentaire est obligatoire pour isoler un CI dont l'arrivée est détectée à l'aide d'un capteur situé en amont. Un CI isolé (Tâche 1) et positionné face à une case libre du rack (Tâche 2), est poussé dans celle-ci (Tâche 3). Suite à la demande d'une machine en aval, après positionnement d'une case occupée, un dispositif éjectera le CI du rack en respectant la contrainte « First IN / First OUT » (Tâche 4). Pour obtenir un graphe optimal, il est nécessaire de remplir un tableau des antériorités (Figure 4) pour les 4 tâches énoncées.

Le concepteur élabore ainsi le grafcet de la commande du procédé du point de vue concepteur présenté figure 5. Pour optimiser le temps de cycle, les tâches 1 et 2 se font simultanément et une demande de

dépilement est prioritaire sur l'empilement d'un nouveau CI

Tâches	Tâches précédentes	T suivantes
T1	T3 + T4	T3
T2	T3 + T4	T3 + T4
T3	T1 . T2	(T1 . T2) + T2
T4	T2	(T1 . T2) + T2

Figure 4 : Tableau des antériorités

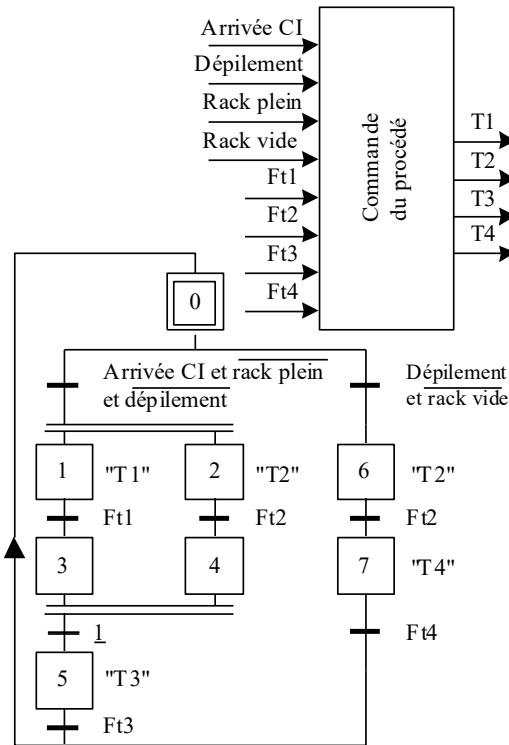


Figure 5 : grafcet de la commande du procédé

Pour simplifier la lecture du graphe, la tâche T2 est dédoublée, elle se trouve dans la branche empilement et également dans la branche dépilement. Chaque réceptivité Ft_i correspond à une fin de tâche. Des contrôles sur le niveau de remplissage du rack, vide ou plein, sont utiles pour éviter des dysfonctionnements.

3. Description de la commande du processus

Le bureau d'étude chargé de la conception de la partie opérative a progressé dans l'étude du système et a fourni au concepteur de la partie commande, une description des effecteurs retenus et donc, des

Réguler Flux CI	Isoler CI	entraîner convoyeur 1	cf1
		entraîner convoyeur 2	cf2
	Aligner case / convoyeur	monter / descendre rack	cf3
		monter / descendre pousseur empilement	cf4
	Empiler CI	sortir / rentrer pousseur empilement	cf5
		monter / descendre pousseur dépilement	cf6
	Dépiler CI	sortir / rentrer pousseur dépilement	cf7

Figure 6 : FAST Processus

mouvements envisagés pour le processus (Figure 6 : FAST processus). Sur ce FAST et le schéma associé (Figure 7), un découpage en chaînes fonctionnelles est précisé.

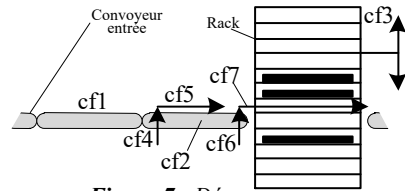


Figure 7 : Découpage en chaînes fonctionnelles

Lors de l'empilement, un CI étant isolé face à une case libre du rack, le doigt pousseur 1 s'érige au travers du convoyeur à courroies puis pousse latéralement le CI dans la case. La tâche d'empilement se termine par un retour de ce pousseur en position de référence. Pour dépiler le CI, un autre dispositif équivalent, appelé pousseur 2 évacue le CI selon un cycle identique au précédent (Figure 8).

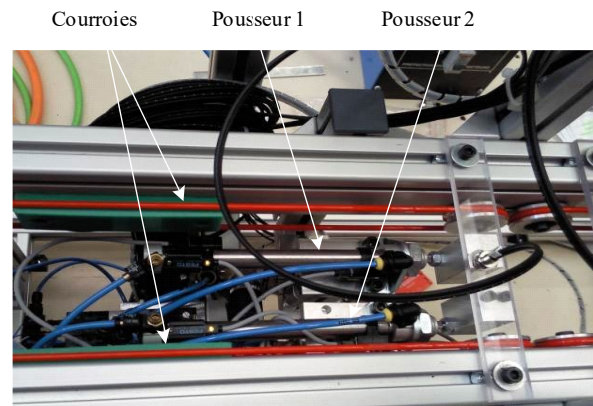


Figure 8 : Convoyeur à courroies et pousseurs

Le convoyeur d'entrée fonctionnant en permanence et les pousseurs se positionnant entre les courroies, il est donc nécessaire de disposer de 2 convoyeurs pour stocker en attente un nouveau CI arrivant durant un cycle d'empilement ou de dépilement.

Pour la suite de l'article, seule la commande de ces 2 convoyeurs sera retenue afin de ne pas disperser le lecteur avec trop d'informations techniques.

Seul le grafcet partiel GT1 (grafcet tâche 1), extrait du grafcet global de la commande des mouvements des effecteurs du point de vue concepteur et une portion du grafcet partiel GCT (grafcet coordination des tâches) seront présentés.

Pour aider à la compréhension de la commande des convoyeurs, la figure 9 présente les différentes situations possibles lors de la phase empilement.

A l'arrivée d'un CI, le convoyeur 1 se met en fonctionnement pour isoler celui-ci, puis s'arrête en attente de l'autorisation de transfert vers le convoyeur

2. En effet les pousseurs 1 et 2 passant au travers du convoyeur, il faut attendre qu'ils soient en position de référence pour pouvoir charger le CI sur le second convoyeur.

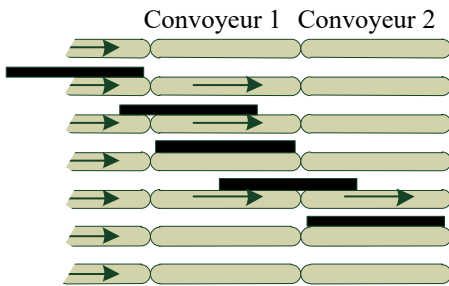


Figure 9 : Convoyeurs 1 & 2

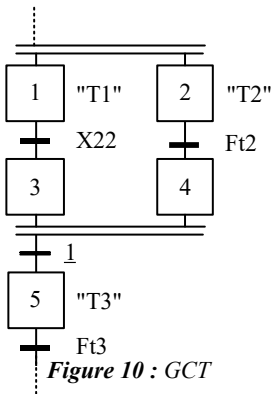


Figure 10 : GCT

Le concepteur de la partie commande a construit le GCT sur la base du grafcet de commande du procédé. L'activation de l'étape X1 autorise l'évolution de la tâche T1, l'empilement étant associé à l'activation de l'étape X5.

Le grafcet partiel GT1 (Figure 11), est composé de 2 grafkets connexes, l'un correspondant à la

commande du convoyeur 1, l'autre à celle du convoyeur 2. Lorsqu'un l'arrivée d'un CI est détectée sur le convoyeur d'entrée, le convoyeur 1 se met en mouvement, étape X11 active. Dès que le CI se trouve intégralement sur le convoyeur 1, celui-ci s'arrête en attendant l'autorisation d'empilement. A l'activation de l'étape X1, autorisation pour isoler un CI, les convoyeurs 1 et 2 démarrent et s'arrêtent dès que le circuit se trouve sur le convoyeur 2. L'activation de l'étape X5, demande d'empilement, autorise la sortie du pousseur 1 qui charge le CI dans une case libre du rack. Les étapes 22 et 23 permettent de mémoriser la présence d'un CI sur le convoyeur 2 et de suivre son évacuation, information qui sera utile lors de l'étude d'une reprise de production après un arrêt d'urgence ou une marche manuelle. De plus, les 2 grafkets connexes ayant une structure identique, il sera possible de créer un bloc générique réutilisable pour cette machine ou pour d'autres car ce type de transfert de pièce en entrée de machine à l'aide de 2 convoyeurs est relativement courant.

4. Description de la commande des pré-actionneurs

Le choix des actionneurs, des pré-actionneurs et des capteurs ayant été réalisé par le bureau d'étude, le concepteur de la partie commande peut alors décrire le

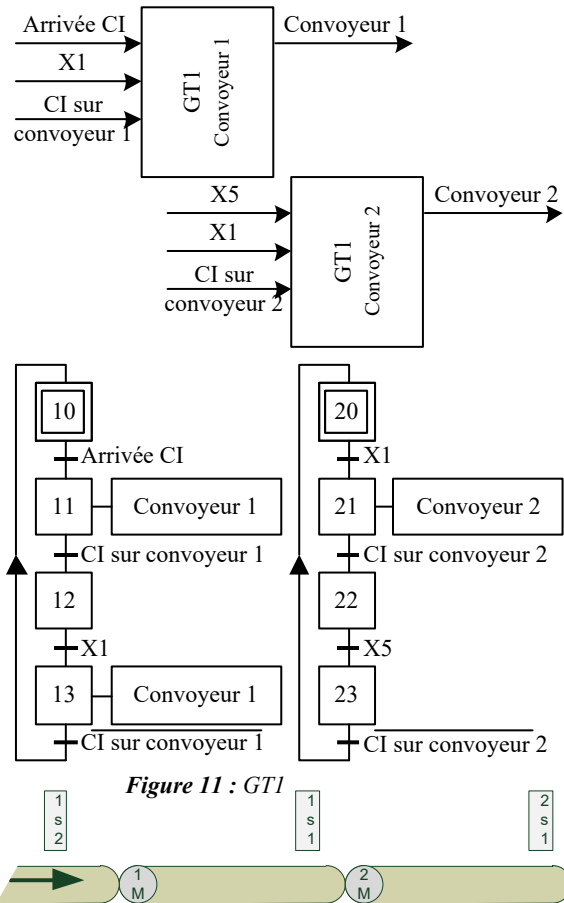


Figure 11 : GT1

Tâche 1		Isoler une plaque CF1 – CF2		
Actionneur	Préactionneur	Nom	Capteur	Nom
1M1 Moteur électrique	Contacteur	S_k1m	Fin convoyeur 1	E_1s1
2M1 Moteur électrique	Contacteur	S_k2m	Fin Convoyeur 2	E_2s1
Informations				
Arrivée CI convoyeur entrée				E_1s2
Demande tâche T1				T_1de
Demande tâche T3				T_3de
				b
				b

Figure 12 : Composants CF1 et CF2

comportement de la commande des pré-actionneurs en tenant compte notamment de leur caractère monostable ou bistable (Figure 12 : composants des chaînes fonctionnelles CF1 et CF2).

Le concepteur de la partie commande a repris la structure du grafcet partiel précédent pour le grafcet partiel de la commande des pré-actionneurs des chaînes fonctionnelles cf1 et cf2 présenté figure 13.

5. Description des ordres élaborés par la PC

Après avoir spécifié le comportement de la commande du cycle de production comprenant la coordination des tâches et la commande des actionneurs, et après avoir décrit la commande des pré-actionneurs, le concepteur doit maintenant aborder le passage à la commande programmée et prendre en compte les modes de marche et d'arrêt.

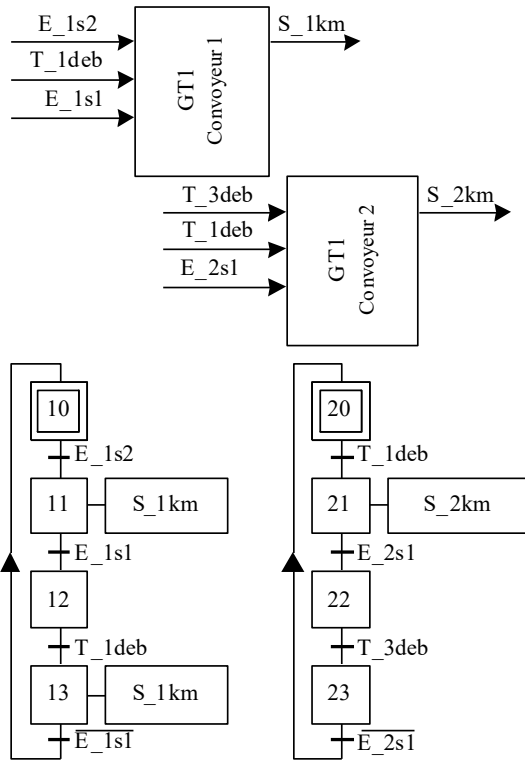


Figure 13 : GT1

L'automate programmable et le progiciel retenu étant définis, il adapte la structure de grafset global en coopération avec le programmeur afin de faciliter le passage de la conception à la réalisation en langage SFC (langage de programmation proche du langage de spécification Grafset). La gestion du fonctionnement normal du système étant maîtrisée, il convient maintenant de prendre en compte la conduite du système et la gestion des situations de dysfonctionnement. A partir des modes de marches et d'arrêts définis dans le cahier des charges, les besoins en sécurité et en communication homme /machine sont exprimés dans le FAST figure 14.

Pour spécifier le comportement de la chaîne de sécurité et la gestion des commandes du pupitre, le concepteur utilise des modules génériques déjà conçus et validés qu'il suffit de compléter pour les adapter aux demandes spécifiques du cahier des charges. Ces modules correspondent à des blocs fonctionnels utilisateurs déjà implantés dans le progiciel qui permet la réalisation du programme de l'automate (Figure 16). Cette réutilisation est un gain de temps important en étude et

en réalisation, elle diminue fortement les erreurs de programmation et de câblage électrique mais nécessite l'utilisation d'un câblage type présenté figure 15 pour respecter les prescriptions de redondance hétérogène de la norme ISO 13850 « Sécurité des machines Arrêt d'urgence ».

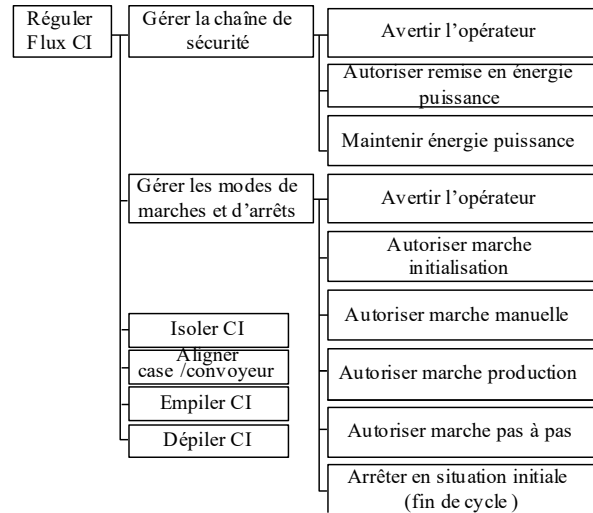


Figure 14 : FAST avec option Sécurité et communication

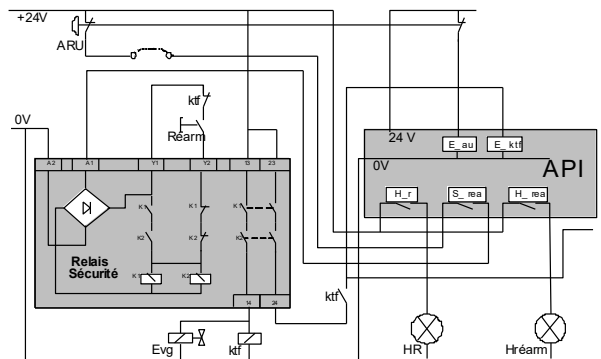


Figure 15 : chaîne de sécurité type

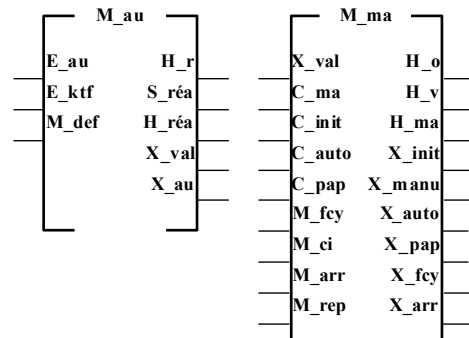


Figure 16 : Modules génériques

Le relais de sécurité assure une coupure puis une remise en service sûre de l'alimentation en énergie de puissance de la partie opérative. L'effet de l'ordre d'arrêt d'urgence de catégorie 0 (suppression immédiate de l'alimentation en énergie des actionneurs) est maintenu jusqu'au réarmement manuel de la chaîne de sécurité par l'opérateur.

Le module générique M_au utilisé, commande la sortie S_réa de l'API permettant ainsi soit de générer directement un arrêt d'urgence par le programme, soit de surveiller les conditions de réarmement du relais de sécurité. L'autre module générique M_ma, figure 16, gère les modes de marches et d'arrêts.

Le cahier des charges précise la présence d'une marche manuelle pour laquelle un sélecteur permet de choisir le numéro de l'actionneur, chaque mouvement étant validé par action sur un bouton poussoir « + » pour la rotation dans un sens des moteurs et pour la sortie des tiges de vérin puis par action sur un bouton poussoir « - » pour les mouvements inverses. Le document indique également qu'un dispositif permettra de sélectionner les différents modes de marches qui seront pour la tâche 1 :

- une marche manuelle (X_manu) ;
- une marche de production automatique (X_auto) ;
- une marche de production pas à pas dans l'ordre du cycle (X_pap).

Les autorisations des évolutions d'un mode de marches à un autre sont assurées par le module M_ma déjà présenté. Le passage du mode X_manu au mode X_auto ou X_pap ne sera possible que si l'opérateur positionne le système en référence.

6. Adaptation du grafcet partiel GT1

Le concepteur de la partie commande intègre directement dans les différents grafquets partiels, les commandes de ces modes de marches. Pour les marches de production, X_auto ou X_pap, les autorisations apparaissent en condition d'assignation sur les actions continues associées aux étapes X11, X13 et X21. Pour rappel, l'information C_+ permet la validation d'un pas tant qu'il est maintenu (Figure 17).

Le passage en marche manuelle, X_manu, force le grafcet GTI en situation initiale, à partir d'un autre grafcet partiel GCI, graphe de contrôle de la tâche T1. Les étapes initiales X10 et X20 étant actives, l'opérateur peut sélectionner l'actionneur en affectant la bonne valeur dans la variable M_sel à l'aide d'un sélecteur au pupitre. Le mouvement est validé par action sur C_+. Suite à une marche manuelle, il est nécessaire de vérifier l'adéquation entre l'état de la partie commande et celui de la partie opérative : partie commande initialisée et partie opérative en référence.

Pour que les variables internes M_1ci et M_2ci destinées au module M_ma soient valides, tout CI présent sur le convoyeur 2 doit être retiré à la main.

De plus le concepteur de la partie commande a rajouté les sécurités M_1def et M_2def. Si un CI est présent sur le convoyeur 1, l'arrivée d'un nouveau CI sur le convoyeur d'entrée entrainera la mise à 1 de la variable M_1def. De même, si deux CI sont simultanément

détectés sur les convoyeurs 1 et 2, la variable M_2def devient vraie.

7. Conclusion sur la structuration choisie

L'écriture en grafcet(s) partiel(s) par chaîne fonctionnelle, permet de regrouper dans un seul ensemble, tout le comportement et les états de celle-ci, depuis sa situation initiale jusqu'aux différents modes

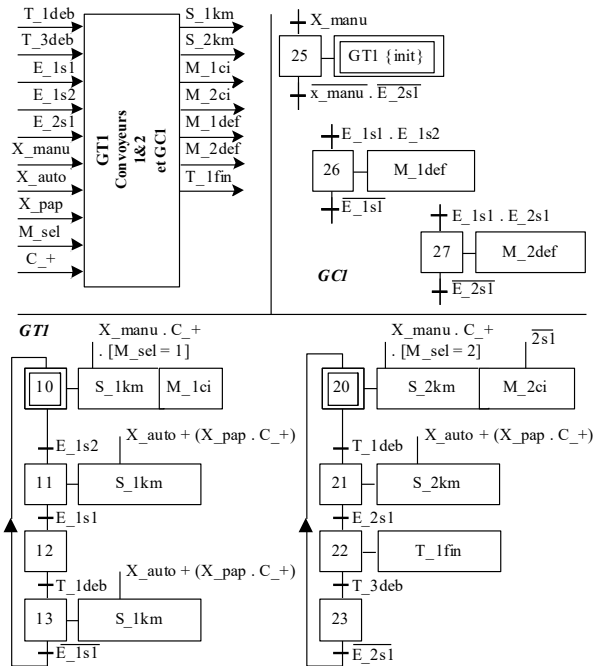


Figure 17 : GTI et GCI

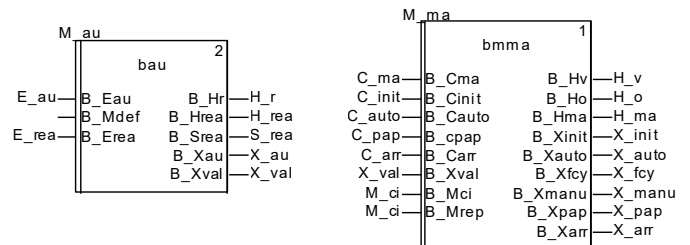


Figure 18 : Instances M_au et M_ma

de marches et d'arrêts. Si ces chaînes fonctionnelles sont régulièrement utilisées, il est alors pratique de réaliser des modules génériques comme pour la chaîne de sécurité.

Les évolutions des différents grafquets partiels sont synchronisées par un grafcet de coordination.

Cette manière de structurer la description des ordres émis par la partie commande facilite la recette des sous-ensembles de la machine qui peuvent être testés, au fur et à mesure de l'avancement de la réalisation, avant de faire une recette globale de la partie commande.



La guerre des courants

Vincent FICHET

Professeur de Physique Appliquée
Lycée Jules Fil, 11021 CARCASSONNE

Résumé : Nos élèves aiment bien qu'on leur raconte des histoires, en particulier l'histoire de leur discipline (surtout quand il y a des anecdotes), et quand on peut relier le passé au présent, soit au travers des objets techniques (machines...), soit que les interlocuteurs existent encore. Et l'occasion est belle pour en tirer des leçons, sur la rigueur scientifique entre autres.

Naissance de l'Electrotechnique.

Le début de l'ère de l'électricité industrielle date de l'invention en 1869 de la Dynamo par le Belge Zénobe GRAMME. C'est la première génératrice industrielle de courant continu. Le principe de l'alternateur était déjà connu, mais on ne voyait aucune application aux courants alternatifs : la référence était le courant continu, que l'on connaissait bien avec les générateurs historiques qu'étaient les piles et les accumulateurs. Et pas question de redresseur à cette époque ! Le régime AC était donc considéré comme sans intérêt.

Le Moteur DC a ensuite été découvert par hasard en 1873, lors d'une erreur de branchement. Ne restait plus qu'à relier l'une à l'autre.

1879 : Thomas EDISON (1847 ;1931).



Inventeur prolifique (plus de 1000 brevets, dont quelques uns sont usurpés à d'autres...), homme d'affaire redoutable et entrepreneur peu scrupuleux. On lui attribue l'invention du phonographe, mais il est très vraisemblable que, ayant pris connaissance des travaux de l'Audois Charles CROS, il lui ait « grillé la

politesse » (de quelques jours !) pour la dépose du brevet. Une revanche pour Edison, qui s'était fait doubler par Graham BELL pour l'invention du téléphone.

Avec l'appui de quelques financiers, Edison crée sa société en 1878 : « Edison Electric Light Company ». Thomas EDISON met au point l'ampoule à incandescence en 1879.

1882 : Premiers Réseaux.

Edison installe en 1882 le 1° réseau de distribution à New York, dans le quartier d'affaire de Wall Street (renvoi d'ascenseur pour ses amis financiers ?). La turbine est à vapeur, la dynamo fait 30kW, le transport se fait sous une tension de 110V DC.

Très vite des problèmes apparaissent : pannes, incendies, et surtout impossibilité de transporter cette électricité au delà de 2 miles, les chutes de tension sont rédhibitoires, une 2° centrale doit alors prendre le relais. De tels réseaux conviennent assez bien dans les villes, mais pas au-delà. Et dire que l'Amérique est un continent !

En France aussi des réseaux DC se développent, il en subsistera à Paris jusque vers 1965 ! D'ailleurs les postes de radio de cette époque héroïque comportait une alimentation « tout courant » : sans transformateur (pour les réseaux DC), avec un redresseur commutable en doubleur de tension (pour le 110/220 AC)

L'ingénieur Marcel DEPREEZ expérimente à la même époque entre Vizille et Grenoble (15km), et il comprend vite l'intérêt du transport sous tension élevée. Mais que faire de quelques milliers de Volt DC au niveau de l'utilisateur ?

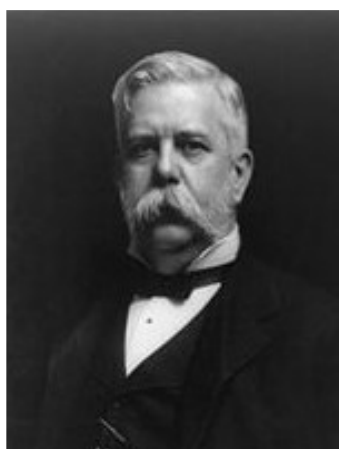


1884 : Le Transformateur.

Bien que son principe soit connu depuis longtemps, le transformateur industriel est mis au point en 1884 par le Français Lucien GAULARD et l'Anglais John GIBBS. Il n'évoluera plus beaucoup jusqu'à nos jours, si ce n'est son circuit magnétique constitué d'une multitude de fils de fer, préfigurant nos circuits feuilletés. Gaulard fait une démonstration de transport AC à Turin sur 80km (2kV, 133Hz) : c'est un succès.

Mais Gaulard n'arrive pas à déposer son brevet, fait procès sur procès, se ruine et finit ses jours en asile d'aliéné.

1886 : George Westinghouse (1846 ;1914).



Inventeur du frein à air comprimé qui porte son nom, George Westinghouse est un industriel dans la distribution de gaz et les réseaux téléphoniques. Très naturellement, il s'intéresse à la distribution électrique et en comprend la problématique.

Un système de distribution électrique comporte un générateur (dynamo DC ou alternateur AC), une infrastructure de transport (ligne DC ou ligne + transfo AC) et de récepteurs (éclairage, et force motrice).

Westinghouse examine le système Edison et constate que son maillon faible est le transport. Pressentant l'intérêt du courant AC, il fait venir d'Europe plusieurs transformateurs, et installe en 1886 le 1^o réseau de distribution AC (3kV) pour l'éclairage dans le Massachusetts, à partir d'une turbine hydroélectrique ; sa société s'appelle la « Westinghouse Electric Corporation ».

En un an, une trentaine de réseaux AC voient le jour. La question du transport est résolue, ce qui fait d'ailleurs que des ressources hydroélectriques distantes sont désormais accessibles et exploitables.

Mais Westinghouse a un problème : il ne peut fournir la force motrice, il n'y a pas de moteur AC, alors qu'Edison dispose du moteur DC à collecteur.

Nikola TESLA (1856 ;1943).



Nikola TESLA est un jeune ingénieur serbe qui s'avérera toute sa vie prolifique en inventions : 900 brevets déposés. Concurrent d'Edison donc, mais il n'était pas autant pragmatique en affaire, et sa vie fut une succession de succès et de déconvenues.

Au début de sa carrière, il travaille à Paris pour Edison. Il s'intéresse aux courants AC, et est sans doute l'initiateur des systèmes polyphasés. A la suite des travaux de Galileo FERRARIS sur les Champs Tournants, il a le premier l'idée du Moteur à Induction (Moteur Asynchrone) vers 1883. Les premiers prototypes de 1887 sont d'ailleurs diphasés.

Devant le peu d'intérêt que son invention trouve en Europe, il accepte la proposition d'Edison de venir aux Etats-Unis : il émigre en 1884, il a alors 28 ans.

Très vite les caractères des deux hommes s'avèrent incompatibles, Edison n'admettant pas l'intérêt que Tesla porte aux courants AC. Tesla s'en va, monte sa propre société avec quelques financiers, se fait rouler, fait faillite et se retrouve simple manœuvre sur un chantier. Il continue néanmoins ses expériences chez lui.

1887 : La Guerre des Courants.

Ayant eu connaissance de ses travaux, Westinghouse embauche alors Tesla en 1887, et lui rachète son Moteur Asynchrone: le système de distribution AC est maintenant complet, il peut fournir éclairage et force motrice. Et devient d'autant plus intéressant qu'en même temps le cours du cuivre grimpe.

Edison est furieux, il lance une campagne de dénigrement et de diffamation : le courant alternatif est plus dangereux que le continu, il ne faut pas téléphoner à proximité d'un câble AC à cause des effets inductifs... Il tente de faire interdire les tensions supérieures à 800V. En vain.



Il collabore à la mise au point de la Chaise Electrique, pour laquelle il préconise... le courant alternatif : les usagers devraient normalement avoir des réticences à utiliser un courant qui sert à tuer des condamnés ; il tente de populariser le terme « westinghousation » pour discréditer son concurrent, et d'ancrer dans les esprits l'association courant alternatif-chaise électrique...

Il convoque la presse à de nombreux essais publics au cours desquels on tue des chiens, des chevaux, et même un éléphant ! La 1^o exécution publique a lieu en 1890, il faut s'y prendre à 2 reprises pour achever le supplicié. Selon Westinghouse, « il aurait mieux valu utiliser une hache ! »

A noter que la contraction de « Electric Execution » nous a laissé le terme « Electro-cution »...

1893 : Niagara...

La bataille décisive a lieu en 1893 : il s'agit de turbiner les chutes du Niagara, pour alimenter la ville industrielle de Buffalo distante de 32 km (puissance : 75MW). Les 2 systèmes sont proposés, et c'est la solution AC (25Hz triphasé) de Westinghouse qui l'emporte.

Edison s'incline, et se résout à adopter le système concurrent. Mais, mauvais perdant, avec une fréquence différente... (d'ailleurs, il a existé une dizaine de fréquences différentes avant la standardisation de 1920, où on a choisi le 50Hz en Europe et le 60Hz en Amérique.)

(Dans l'Aude, à la mise en service en 1901 dans la haute-vallée de la centrale de Saint Georges qui évacue en 20kVAC, la vieille usine électrique à charbon de Carcassonne est adaptée pour transformer cette HT en 125VDC, tension utilisée depuis 1891 par la SMTF, Société Méridionale de Transport de Force.)

Finalement la raison l'a emporté, et c'est un véritable choix technologique qui a été effectué. Mais bizarrerie de l'histoire, grâce aux semi-conducteurs, on assiste un siècle plus tard à un retour du transport sous forme DC dans certains cas, telle l'interconnexion France - Angleterre (2000MW sous 270kV DC)

La société d'Edison s'appelle désormais « General Electric ».

Mais parfois l'histoire bégaie...

Où l'on retrouve nos héros.

Au début des années 70, EDF souhaite changer de filière électro-nucléaire pour se débarrasser de la tutelle pesante du CEA (filiale Graphite-Gaz UNGC). Mais EDF n'a pas a priori de choix arrêté.

Après un premier examen, il reste 2 filières en lice :

- Le réacteur à eau bouillante (BWR) mis au point par General Electric,
- Le réacteur à eau sous pression (PWR) mis au point par... Westinghouse !

Une nouvelle guerre s'annonce, 2 groupes se constituent autour d'acteurs industriels, financiers et politiques :

- Le groupe SOGERCA pour le BWR, avec la Compagnie Générale d'Electricité (CGE, qui contrôle Alstom) ; son PDG Ambroise Roux est un ami de Georges Pompidou, qui est alors président de la république ; un appui précieux...

- Le groupe FRAMATOME pour le PWR, associant Creusot-Loire et Jeumont-Schneider, avec Valéry Giscard d'Estaing (ce qui est tout naturel, puisque son épouse n'est autre qu'Anne-Aymone Schneider, fille du baron Schneider).

Deux prototypes sont prévus pour départager les filières concurrentes, un réacteur BWR à Bugey (Ain), un PWR à Fessenheim. Les 2 groupes se neutralisent.

Et voilà qu'on apprend que Pompidou a un cancer (il décèdera en 1974), cela ruine les espoirs du groupe BWR-CGE, et le groupe PWR-Creusot-Schneider reste seul en lice et sans concurrent ! Le parc français sera donc à eau sous pression.

Cette fois, le choix n'aura pas véritablement été technologique...

Références

Henri ALAUX (De la Lumière et des Hommes, Editeur EDF Vallées d'Aude)

Bernard CARLSON (Pour la Science n°330, avril 2005)

Philippe CARRIVE (Techniques de l'Ingénieur D4210 : Structure des réseaux)

Alain CUNIERE (Revue 3EI n°11)

François MESLIER ; Henri PERSOZ (Techniques de l'Ingénieur D4070 : Réseaux de transport et d'interconnexion)

Jacques REY (Revue « Sortir du Nucléaire » n°22)

Encyclopedia Universalis, rubriques Edison, Tesla, Westinghouse...

Wikipédia

