

Une plateforme expérimentale « smartgrid » pour l'apprentissage du génie électrique en cycle ingénieur

Fabrice LEFEBVRE^{1,2}, Bernard PITON¹, Michel BRICOUT³

fabrice.lefebvre@uphf.fr

¹INSA Hauts de France

²IEMN-DOAE UMR CNRS 8520

UPHF, Campus du Mont Houy, 59313 VALENCIENNES

³Lycée J. M. Jacquard, 59540 Caudry

contact : fabrice.lefebvre@uphf.fr

RESUME : Cet article décrit une plateforme expérimentale modulaire réalisée un sein de l'INSA Hauts de France. Elle est destinée à l'enseignement du génie électrique à des élèves ingénieurs par apprentissage. La thématique du « smartgrid » a été choisie pour son actualité et pour le large éventail de compétences en génie électrique et en systèmes complexes qu'elle requiert. En dépit de la tendance à utiliser exclusivement la simulation numérique dans l'enseignement des sciences appliquées, les auteurs sont convaincus du bien-fondé pédagogique de l'expérimentation « en dur » dans les processus d'apprentissage.

Mots clés : Génie électrique, Smartgrid, Plate-forme expérimentale, Systémique, Apprentissage par projet.

1 INTRODUCTION

Les méthodes classiques d'enseignement perdent en efficacité année après année auprès des étudiants. Nous avons remarqué un manque d'intérêt croissant pour les cours, travaux dirigés et travaux pratiques sous leur forme « classique ». L'apprentissage, dès la première année du cycle d'ingénieur, les confronte aux réalités pratiques du terrain.

La périodicité courte retenue par l'INSA Hauts de France (moitié de la semaine en entreprise / moitié en école) aggrave la situation dans le sens où les élèves n'ont pas le temps de se réinstaller dans un rythme et un contexte universitaire.

Ces constats nous ont conduit à modifier nos pratiques d'enseignement et à nous orienter vers une pédagogie plus active basée sur le projet [1].

C'est cette expérience menée auprès de nos étudiants au cours des deux dernières années du cycle d'ingénieur en génie électrique et informatique industrielle que nous décrivons ici. Cette période de formation comporte des enseignements optionnels en gestion de l'énergie électrique et des énergies renouvelables. Elle nous a servi de support pour cette nouvelle approche pédagogique.

Les problématiques liées à la production, au transport et à la distribution de l'énergie élec-

trique sont complexes car le système nécessite une gestion intelligente du réseau [2,3]. L'absence de moyen de stockage de masse d'énergie électrique (hormis le stockage hydraulique gravitaire lorsque la géographie le permet) nécessite un équilibrage en temps réel de la production et de la consommation. Ce problème est d'autant plus vrai avec l'insertion d'énergies renouvelables (solaire et éolienne) sur le réseau. Ces sources d'énergie ont deux caractéristiques qui imposent un changement de paradigme dans la gestion de l'énergie : leur décentralisation et leur intermittence. Face à ces enjeux et aux objectifs de formation de nos futurs ingénieurs, nous devons aborder ces problématiques d'une manière attractive, prenant en compte la diversité des parcours scolaires, les aspirations professionnelles, compétences initiales des étudiants, et les besoins du marché de l'emploi dans ce domaine. En développant une plateforme expérimentale dédiée à l'enseignement du génie électrique et à la gestion intelligente de l'énergie, nous espérons répondre aux attentes des étudiants et des professionnels du secteur avec pour mot d'ordre : la pratique fixe les concepts¹.

¹ Cette assertion s'inspire du philosophe Confucius: "I hear and I forget. I see and I remember. I do and I understand."

2 LA PLATE-FORME EXPERIMENTALE

Pour mener à bien ce projet, nous avons reconstitué un « micro-smartgrid » (réseau électrique artificiel triphasé) à l'aide de deux groupes alternateurs de 1,5kW chacun. Ces deux groupes sont entraînés chacun par un moteur électrique alimenté par le réseau de distribution. Le choix d'un entraînement par moteur électrique des alternateurs est purement d'ordre pratique. En effet, le sujet d'étude est la production électrique et la source d'énergie mécanique (turbine) sera simulée par l'association du moteur d'entraînement et de son variateur. Ces deux machines simulent des sources de génération conventionnelles stables (centrales). Il est dès lors possible d'étudier la machine synchrone comme unité de production et les conditions de synchronisation de plusieurs machines entre elles et sur un réseau puissant. La compensation synchrone de l'énergie réactive peut également

être abordée. Ces groupes attaquent un ensemble de lignes électriques triphasées organisées en triangle et simulées par des inductances réglables. Sur le réseau constitué, nous avons prévu un banc de charges statiques (RLC) ainsi que des charges dynamiques produisant des harmoniques sur le réseau. Ces éléments sont destinés à simuler des utilisateurs connectés au réseau. Des sources d'énergies renouvelables sont également prévues (banc solaire et éolien). Les conditions de raccordement de ces sources sur le réseau artificiel via un onduleur triphasé et l'influence sur la stabilité de celui-ci peuvent ainsi être étudiées. Un banc de turbinage a été converti en simulateur de barrage hydroélectrique pouvant être raccordé à l'installation (stockage gravitaire) par l'intermédiaire d'un bus continu et d'un onduleur triphasé. La problématique du stockage d'énergie peut être abordée selon l'application : batterie, hydrogène, stockage inertiel. Le synoptique général de la plate-forme est représenté sur la figure 1.

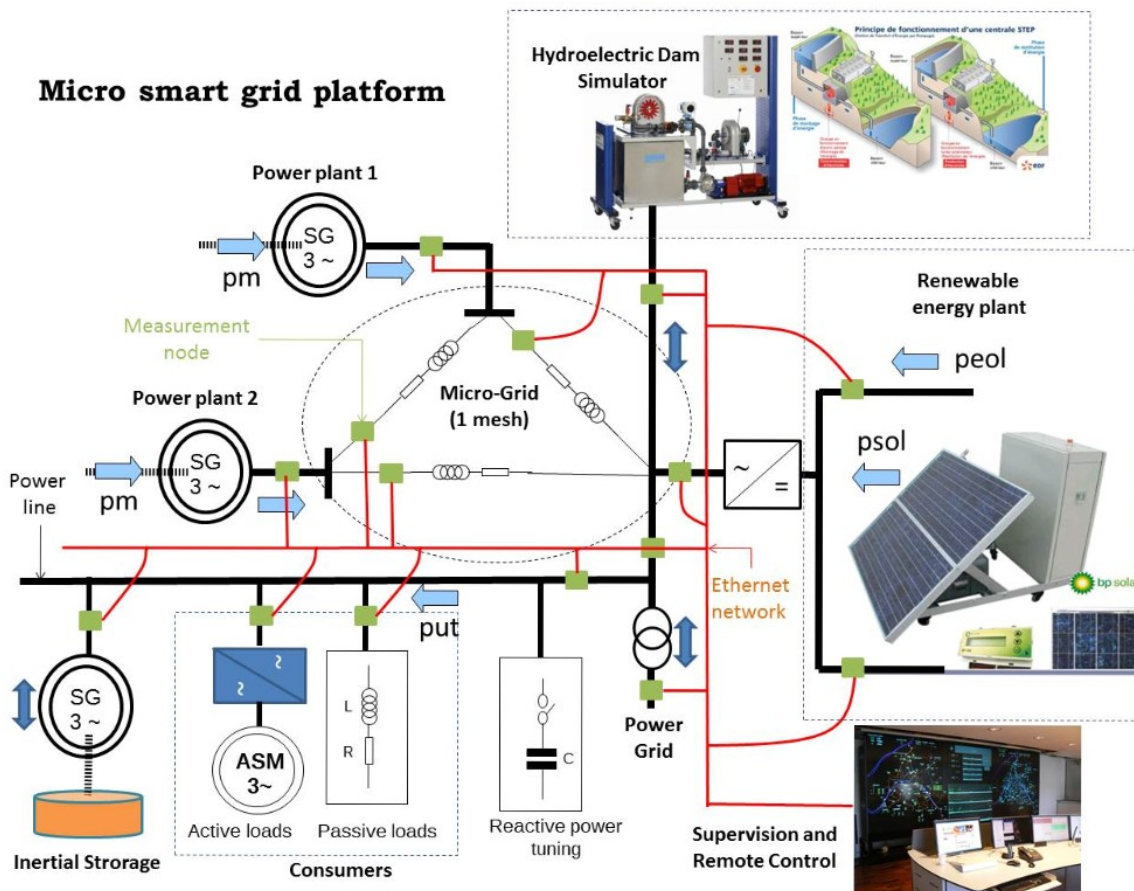


Figure 1. Synoptique de la plateforme « smartgrid ».

3 OBJECTIFS GENERAUX DU PROJET

Sur le plan pédagogique, cette plate-forme permet de développer chez les étudiants, en 2^{ème} et 3^{ème} année du cycle ingénieur, des compétences en génie électrique au travers de projets tels que :

- La production conventionnelle d'énergie électrique (alternateurs) sous les aspects électrotechnique, contrôle / commande, couplage...
- La problématique de l'intégration des sources d'énergies renouvelables qui sont par nature intermittentes (photovoltaïque et éolien),
- Simulation par le réel d'un barrage hydro-électrique,
- Modélisation, simulation et étude de la stabilité d'un réseau électrique,
- Supervision des dispositifs de production d'énergie,
- Stratégies de gestion de l'énergie électrique, de son stockage et de sa qualité,
- Etude de chaînes de conversion et de stockage de l'énergie électrique (hacheur, batterie, onduleur...),
- Etude d'un réseau électrique intelligent (« smartgrid »).

4 DESCRIPTIF DE LA PLATE-FORME

La figure 2 présente le banc de production conventionnelle constitué de deux alternateurs entraînés par deux moteurs asynchrones pilotés par des variateurs de vitesse dont le rôle est de simuler le fonctionnement d'une turbine de centrale. On distingue également les automates de pilotage, les différents régulateurs (vitesse et tension) ainsi que les synchrosopes permettant le couplage des alternateurs en parallèle et sur le réseau. L'ensemble du banc est entièrement instrumenté et toutes les données électriques et mécaniques peuvent être récupérées par le poste de supervision au travers de serveurs Web embarqués sur les automates.

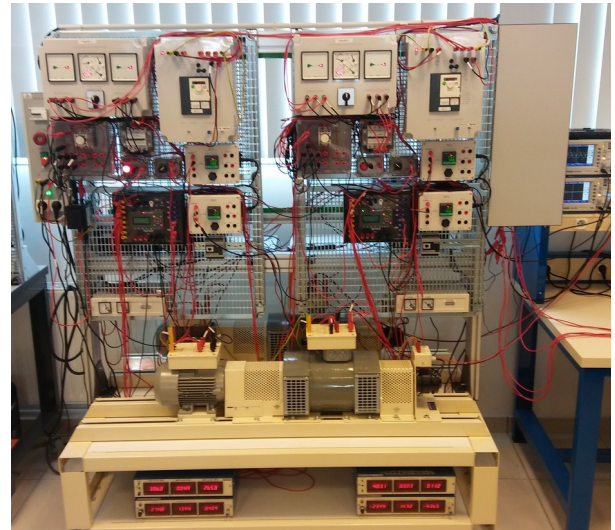


Figure 2. Productions conventionnelles (centrales).

La figure 3 montre les trois lignes triphasées de transport d'énergie. Elles sont simulées par des inductances triphasées réglables qui représentent les lignes aériennes réelles d'une longueur pouvant aller jusqu'à 200 km. Chaque ligne est instrumentée par un compteur d'énergie embarquant un serveur Web consultable depuis le poste de supervision. Des contacteurs permettent d'enclencher ou de déclencher les lignes afin de simuler des incidents.

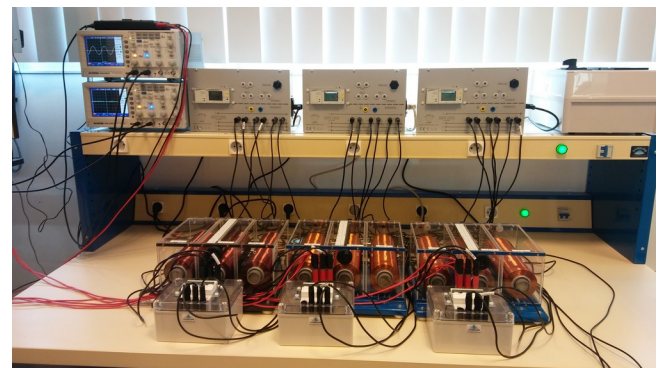


Figure 3. Lignes de transport d'énergie et comptage.

La figure 4 représente une partie du banc de charge (RLC) simulant les consommateurs. Une charge active constituée d'un moteur asynchrone et d'un variateur de vitesse est également disponible de façon à produire des harmoniques sur le réseau.



Figure 4. Banc de charge (consommateurs).

Le dispositif de production solaire et éolien est visualisé sur la figure 5. Un panneau solaire de 380 W et une petite éolienne de 500 W sont installés à l'extérieur du bâtiment et raccordés à une armoire électrique ainsi qu'une batterie de stockage situés dans la salle projet. L'ensemble est connecté au reste de l'installation via un onduleur triphasé. Un automate embarquant un serveur Web permet la supervision de l'ensemble de la production renouvelable et de l'injection sur le réseau.

Si les conditions météorologiques ne le permettent pas, nous disposons également d'une alimentation simulant le panneau solaire ainsi qu'un banc de simulation d'éolienne hyper-synchrone.



Figure 5. Energies renouvelables (solaire + éolien).

Sur la figure 6 est présenté le banc de simulation de barrage hydroélectrique. Il s'agit en fait d'un banc d'étude de turbine hydraulique qui a été modifié pour accueillir un alternateur triphasé. Un pilotage ad-hoc du banc permet de simuler des cycles de pompage-turbinage d'un barrage

STEP (Station de Transfert d'Énergie par Pompage).

L'injection de l'énergie électrique produite vers le reste de l'installation est assurée par un convertisseur alternatif - continu, un bus continu et un onduleur triphasé. Cette configuration permet d'étudier le transport d'énergie sur une ligne continue.



Figure 6. Simulateur de barrage hydroélectrique.

Finalement, la figure 7 montre une capture d'écran d'une application de supervision en cours de développement sous LabView. L'application de supervision centralise toutes les données de l'installation en effectuant des requêtes http sur les différents serveurs Web disséminés sur l'installation. L'utilisation conjointe avec un logiciel de simulation de réseau permet d'étudier différentes stratégies de pilotage.

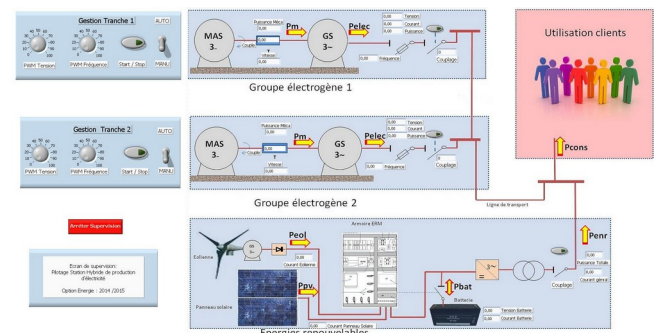


Figure 7. Supervision.

5 ORGANISATION PEDAGOGIQUE

5.1 Un projet en 2 phases

La première phase, réalisée en 2^{ème} année, consiste à analyser les aspects structurels, fonctionnels et les différents composants de la plate-forme à partir du synoptique et du matériel à disposition.

La deuxième phase, réalisée dans la continuité en 3^{ème} année, consiste au développement de la plate-forme et à son pilotage. Elle s'appuie sur les compétences acquises et la base documentaire constituée lors de la première phase.

1^{ère} phase (~30h) – 2^{ème} année.

Cette phase constitue une phase d'auto-apprentissage des éléments scientifiques et techniques nécessaires au bon déroulement du projet. Un référentiel listant l'ensemble des connaissances qu'il est indispensable d'acquérir au cours du projet sert de base et de référentiel pour l'évaluation finale sous forme de quiz.

Dans cette phase, il est demandé aux étudiants :

1. D'identifier les différents composants de la plate-forme (compiler et compléter la documentation existante afin de constituer une base de données documentaire hiérarchisée utilisable par tous),
2. D'effectuer une analyse structurelle de la plate-forme (identifier les sous-ensembles ainsi que leurs composants, les lier à la base documentaire),
3. D'effectuer une analyse fonctionnelle (identification du besoin, analyse des exigences, identification des acteurs et leurs interactions avec le système en vue de dégager l'ensemble des paramètres à contrôler et à mesurer),
4. D'identifier les flux d'énergie et d'information au travers du système.

L'organisation du projet est libre. Toutefois, il est fortement conseillé de constituer des groupes de travail par thèmes, par ensembles de composants, ou par sous-ensembles système ou autre. Pour cela, un coordinateur du projet est désigné collégialement. Il est chargé de mettre en place une matrice de compétences afin de constituer les groupes de travail. Il veille au suivi, à la produc-

tion des livrables demandés et de façon générale au bon déroulement du projet.

A mi-parcours, une revue de projet intermédiaire a lieu sous la forme d'une présentation orale. Elle doit permettre de s'assurer de l'avancement correct du projet et d'effectuer des recadrages si nécessaire. Une première notation est effectuée à ce niveau.

D'autres revues de projet pourront être faites en cours de route si nécessaire.

A l'issue de cette séquence, un rapport écrit et une présentation orale font l'objet d'une évaluation. L'ensemble des connaissances sur chacun des domaines doivent être acquises par tous. A l'issue de cette phase une évaluation écrite individuelle a lieu sous la forme d'un quiz.

2^{ème} phase (~70h) – 3^{ème} année.

Cette seconde phase s'appuie sur les acquis de la deuxième année. Un coordonnateur de projet est désigné par les étudiants. Il a pour missions de :

- Planifier et coordonner le déroulement du projet,
- Veiller au respect du cahier des charges,
- Gérer et planifier le déroulement du projet avec les outils de management de projet adéquats,
- Assurer la composition des équipes selon les compétences et les envies de chacun.
- Faire le lien entre l'équipe enseignante et les étudiants en charge du projet,
- Faire un reporting régulier.

Une importance particulière est donnée à la communication et à la médiatisation des résultats. Le choix des outils de synthèse et de présentation (matrices, cartes conceptuelles, graphisme, vidéos...) fait partie des attentes.

D'un point de vue scientifique, le projet est découpé en 3 domaines :

1. Production, Régulation, Transport (PRT).
2. Mesure, Communication, Supervision (MCS).

3. Energie Renouvelable et Hydroélectricité (ERH).

D'un point de vue séquençement temporel, le projet est organisé en 2 périodes :

Période 1 (env. 30%)

L'*objectif principal* lors de la cette première période est de vérifier la pertinence de l'analyse et la capitalisation de connaissances réalisées jusqu'alors. Les étudiants font un point et pallient aux éventuels manques et imperfections mis en lumière.

Le *deuxième objectif* de cette première période est la rédaction d'un cahier des charges fonctionnel. Pour ce faire on s'appuiera sur la méthodologie « ingénierie système » que permet le langage de modélisation SysML [4].

L'analyse attendue se déroule selon les étapes suivantes basées sur SysML :

- Rédaction du diagramme des cas d'utilisation,
- Rédaction du diagramme des exigences,
- Rédaction du diagramme de blocs internes,
- Rédaction du diagramme de séquence,
- Rédaction du diagramme d'activité,
- Rédaction du diagramme d'état.

Le cahier des charges décrivant le but à atteindre par la plateforme, les façons d'y arriver, les différents modes de fonctionnement, les solutions techniques à mettre en place, etc... élaboré à partir de cette analyse sera confronté au système existant. L'analyse des écarts entre le cahier des charges et l'existant doit conduire à des actions correctives afin de les réduire. Cela peut aller du simple réglage d'un paramètre à la réalisation d'un composant réalisant une fonction déterminée. A l'issue de cette période, le cahier des charges est livré et fait l'objet d'une présentation orale évaluée.

Période 2 (env. 70%)

Cette seconde période a pour objet le développement et la mise en œuvre de la plate-forme conformément au cahier des charges et au plan d'action. Chaque équipe prend en charge un ou plusieurs sujets conformément au découpage pro-

posé de manière collégiale sous couvert du coordinateur projet.

Deux revues de projet sont organisées par le coordinateur aux environs du tiers et des deux tiers de la période afin de valider l'avancement et d'effectuer les éventuels recadrages nécessaires. A l'issue de cette période, la validation des fonctionnalités du système ainsi qu'un rapport de synthèse écrit sont présentés oralement et font l'objet d'une évaluation.

6 CONCLUSION

Historiquement, le projet s'est construit petit à petit, modestement. Au vu de l'engouement des étudiants pour ce genre d'approche pédagogique et de l'intérêt manifesté par les professionnels du secteur, il s'est étoffé à fil des années. Il permet aujourd'hui une véritable approche globale de la gestion de l'énergie électrique et embrasse tous les domaines du génie électrique. Il est en constante évolution et chaque année apporte son lot de nouvelles problématiques à traiter. Cet aspect « vivant » est source de motivation pour les étudiants.

A l'issue de chaque « génération » d'étudiants, il est demandé de faire part collectivement (oralement) et individuellement (sous la forme d'un écrit anonyme) de leur ressenti. Ces deux formes de retours convergent généralement.

On note un accroissement de la motivation grâce notamment à :

- L'autonomie totale accordée dans la gestion du projet,
- Le travail en équipe qui permet de développer la confiance en soi et envers les autres,
- La transmission et le partage des connaissances acquises,
- La capacité à résoudre des problèmes seul et / ou collectivement,
- La « conscientisation » des compétences académiques acquises tout au long du parcours de formation. Le projet permet de mobiliser les connaissances acquises dans les différentes disciplines pour mener à son terme la réalisation concrète d'un système complexe.

Des situations conflictuelles peuvent survenir entre étudiants conduisant à des difficultés d'acceptation du mode d'enseignement par projet collaboratif. Cette situation, relativement rare, est gérée conjointement avec le chef de projet et l'ensemble de l'équipe afin que tout le monde en sorte grandi.

7 REMERCIEMENTS

Tous nos remerciements à FORMASUP Nord – Pas de Calais pour son soutien financier constant lors du développement de la plateforme et à l'INSA Haut de France (ex ENSIAME) pour son soutien logistique et financier.

Bibliographie

- [1] Nicolas Wapler, "Initiation à l'efficacité en pédagogie", En pdf sur : <http://www.pedagogie-active.fr>
- [2] Pieter Schavenmaker, Lou van der Sluis, "Le réseau électrique dans son intégralité", Traduction de Emmanuel Hoang, EDP Sciences 2019.
- [3] Jizhong Zhu, "Optimization of power system operation", Wiley & Sons, 2009.
- [4] Pascal Roques, "Modélisation de systèmes complexes avec SysML", Editions Eyrolles.