

Exploitation pédagogique basée sur l'étude de l'installation photovoltaïque avec stockage de 1 MWc

Culture Sciences
de l'Ingénieur

La Revue
3E.I

Omar RAMI-YAHYAOUÏ¹

Édité le
23/03/2026

école normale
supérieure
paris-saclay

¹ Université Paris-Est Créteil (U-PEC)

Cette ressource fait partie du N° 119 de La Revue 3EI du 2^{ème} trimestre 2026.

Pour faire suite à l'article « Étude de dimensionnement industriel d'une installation photovoltaïque de 1 MWc connectée au réseau avec stockage » présentant la solution technique à une installation photovoltaïque de 1 MWc avec stockage [8], nous proposons trois exploitations pédagogiques basées sur cette étude, et ce pour trois niveaux scolaires différents :

- Terminale de BAC STI2D (Sciences et Technologies de l'Industrie et du Développement Durable) en démarche de projet ;
- 2^{ème} année du BUT GEII (Bachelor Universitaire de Technologie en Génie Electrique et Informatique Industrielle) dans une démarche de résolution d'un problème technique ;
- 2^{ème} année en Classe Préparatoire aux Grandes Ecoles de spécialité PTSI (Physique, Technologie et Sciences de l'Ingénieur) à travers une démarche cette fois-ci scientifique.

Ainsi, la première exploitation sera de type « projet » orientée vers la terminale BAC STI2D visant à la réalisation d'une maquette représentant le hangar de stockage du matériel d'un agriculteur désirant la version îlotée d'une installation PV, généralement économiquement plus abordable, et répondant au besoin d'être énergétiquement autonome, sans dépendance au réseau de distribution.

La seconde, de type « résolution de problèmes techniques » est dédiée à une classe de 2^{ème} année du nouveau BUT GEII et concerne la résolution d'une problématique d'optimisation par un onduleur de l'énergie fournie par des modules photovoltaïques à un réseau électrique d'alimentation.

Enfin, la dernière, de type « démarche scientifique », vise une classe de seconde année de CPGE PTSI et est orientée vers l'évaluation des écarts entre des optimisations réelles et simulées de la production de différentes sources d'énergie renouvelable.

Certaines de ces séquences pédagogiques ont pu être testées avec des étudiants de master MEEF Sciences Industrielles de l'Ingénieur comme ce sera indiqué dans la suite.

1 - Exploitation pédagogique en démarche de projet dans le cadre d'un BAC STI 2D

La première exploitation pédagogique de l'étude technique est proposée dans le cadre d'un projet collaboratif avec un demi-groupe de 16 élèves d'une terminale de BAC STI2D, aboutissant à une maquette représentative du hangar de l'agriculteur. Un exemple, au format réduit, d'un livrable

possible de cette exploitation rendu par l'équipe des 4 élèves concernés par le projet, est présenté à la figure 1 :

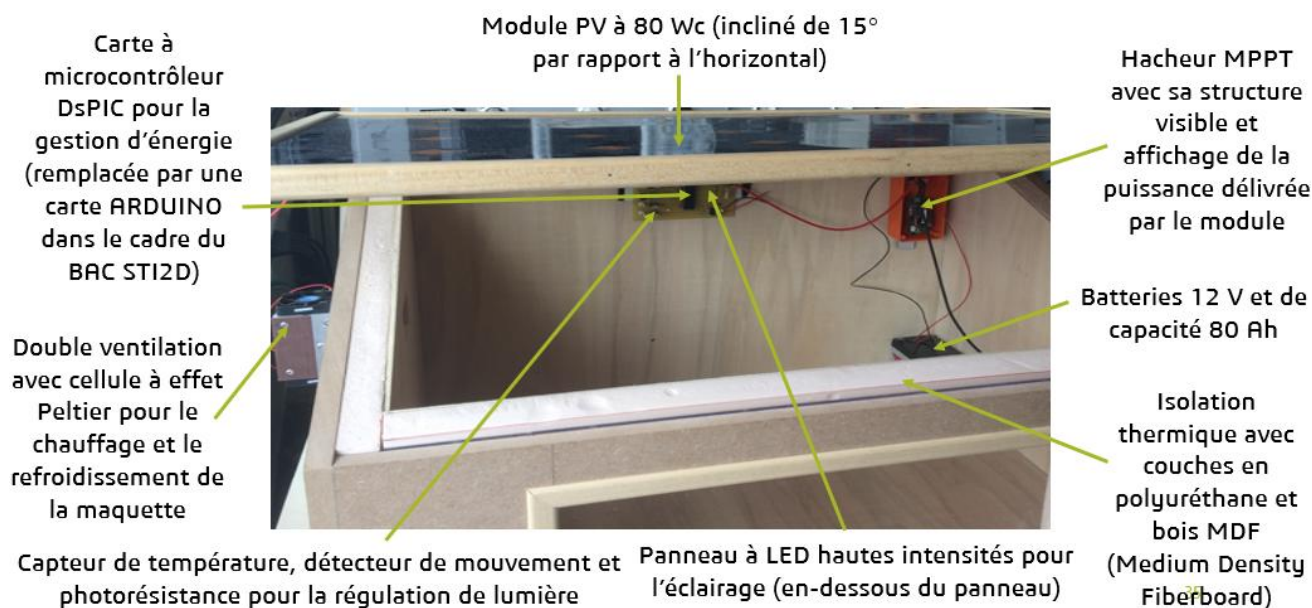


Figure 1 : Exemple en format réduit d'un attendu possible de la première exploitation pédagogique répondant au contrat pédagogique de l'annexe 1 [9], et aboutissant sur la réalisation d'un hangar d'agriculteur

Pour ce faire, quatre séquences sont proposées contenant chacune trois séances en démarche de projet pédagogique. Cette dernière propose en effet une nouvelle façon d'enseigner, plus variée, car balayant plusieurs compétences du référentiel, mais aussi plus concrète pour les élèves, leur permettant de travailler en équipe.

1.1 - Description détaillée de chaque séquence

a) Séquence 1 : Comment s'approprier le cahier des charges (CDC) pédagogique des projets (dotation horaire : 9 heures) ?

Lors de cette première séquence (voir figure 3), nous commençons par présenter le cahier des charges de 4 projets aux 4 équipes formées chacune de 4 élèves, et dont le contenu de celui correspondant à la figure 1 se trouve figure 2 :

FICHE PROJET

Lycée Marie Curie
Session 2020

académie Amiens

INTITULE DU PROJET
Effectif : 4

AMELIORATION DE L'EFFICACITE ENERGETIQUE D'UN HANGAR

ENJEU

Question de société, enjeu du DDT, ...

De nos jours, de plus en plus de bâtiments font une gestion intelligente de leur consommation électrique. Ainsi les piliers du développement durable associés à ce projet sont :

- Social : Confort des usagers dans un local
- Économique : Gain avec l'économie d'énergie réalisée grâce à cette amélioration
- Environnemental : Cette baisse implique une diminution des émissions CO2

PROBLEMATIQUE

Problème technique à résoudre

Comment améliorer l'efficacité énergétique d'un hangar d'agriculteur de façon que celui-ci acquiert suffisamment d'autonomie ? Pour ce faire, il faudra réaliser une maquette de ce local. Celle-ci devra être testée et validée de façon qu'elle soit autonome énergétiquement, alimentée par une source à énergie renouvelable avec une batterie de stockage reprenant le relais en cas d'une sous production ou surconsommation des charges de la maquette.

PROFESSEUR REFERENT : RAMI Omar

EQUIPE PEDAGOGIQUE associée : AKABLI Khalid

SUPPORT

Coller une image donnant un repère visuel du projet

Figure 2 : Fiche du premier projet correspondant à la première exploitation

Le support de cette présentation est le tableau où est projeté leur énoncé. Ainsi, leur contenu est déroulé en montrant leur intitulé, leurs thèmes sociétaux, leur contexte, leurs enjeux, leur problématique, leurs diagrammes SYSML, et l'objectif général de chaque projet.

À la séance 2 qui suit, un cahier des charges doit être choisi par équipe, ainsi que son appropriation, pour préparer la planification des tâches associées sur un volume horaire individuel de 72 heures, allant de fin mars à fin mai de l'année de terminale, et ce à raison de 9 heures par semaine sur les 12 heures de 212D (Ingénierie, Innovation et Développement Durable), donc étalées sur 8 semaines.

En effet, cette dernière phase d'organisation doit s'effectuer lors de la séance 3, permettant de planifier les tâches sur un calendrier (diagramme de GANTT) jalonnant les futures étapes de leur réalisation afin d'atteindre l'objectif final de chaque projet. Ces étapes ont lieu durant les trois prochaines phases à savoir : propositions de solutions répondant au besoin exprimé par chaque projet, conception de la meilleure solution et sa mise en œuvre, sanctionnées par trois revues de projet. Enfin, la posture à adopter est celle d'un responsable de leur suivi et de leurs évaluations formatives à travers ces revues, et certificative par une dernière restitution finale dans le cadre du « grand oral » du BAC. La fiche de la 1^{ère} séquence présentée ci-dessous à la figure 3 est commune aux quatre projets, et donne les objectifs opérationnels des trois séances qui la constituent, les compétences visées, ainsi que la répartition de sa dotation horaire globale :

Objectifs opérationnels des séances de la 1^{ère} séquence : Séance 1 : S'approprier le CDC des 4 projets par l'ensemble des équipes. Séance 2 : Décliner chaque projet en un ensemble de tâches suivant un enchaînement logique. Séance 3 : Se répartir ces tâches entre les membres de l'équipe du projet et les planifier grâce à un diagramme de GANTT.										Comment s'approprier le CDC, s'organiser, et planifier les tâches de chaque projet ?																																																																																																																																																															
Pistes d'évaluation : Première évaluation formative à la prochaine séquence.										ENSEIGNEMENT DE SPECIALITE																																																																																																																																																															
										AC : ☒	ITEC : ☐	SIN : ☐	EE : ☒																																																																																																																																																												
Situation dans la progression		1 ^{ère}							Durée : 1 semaine	EFFECTIF ELEVES		NOMBRE D'HEURES	NOMBRES D'ELEVES PAR GROUPE																																																																																																																																																												
		Tale																																																																																																																																																																							

Figure 3 : Déroulé de la première séquence du premier projet

b) Séquence 2 : Recherche de solutions (dotation horaire : 12 heures) :

Cette séquence (voir figure 5) a pour objectif lors de la séance 1 d'analyser le besoin exprimé par le cahier des charges pédagogique du projet à travers le diagramme des exigences SYSML de la figure 4 ci-dessous :

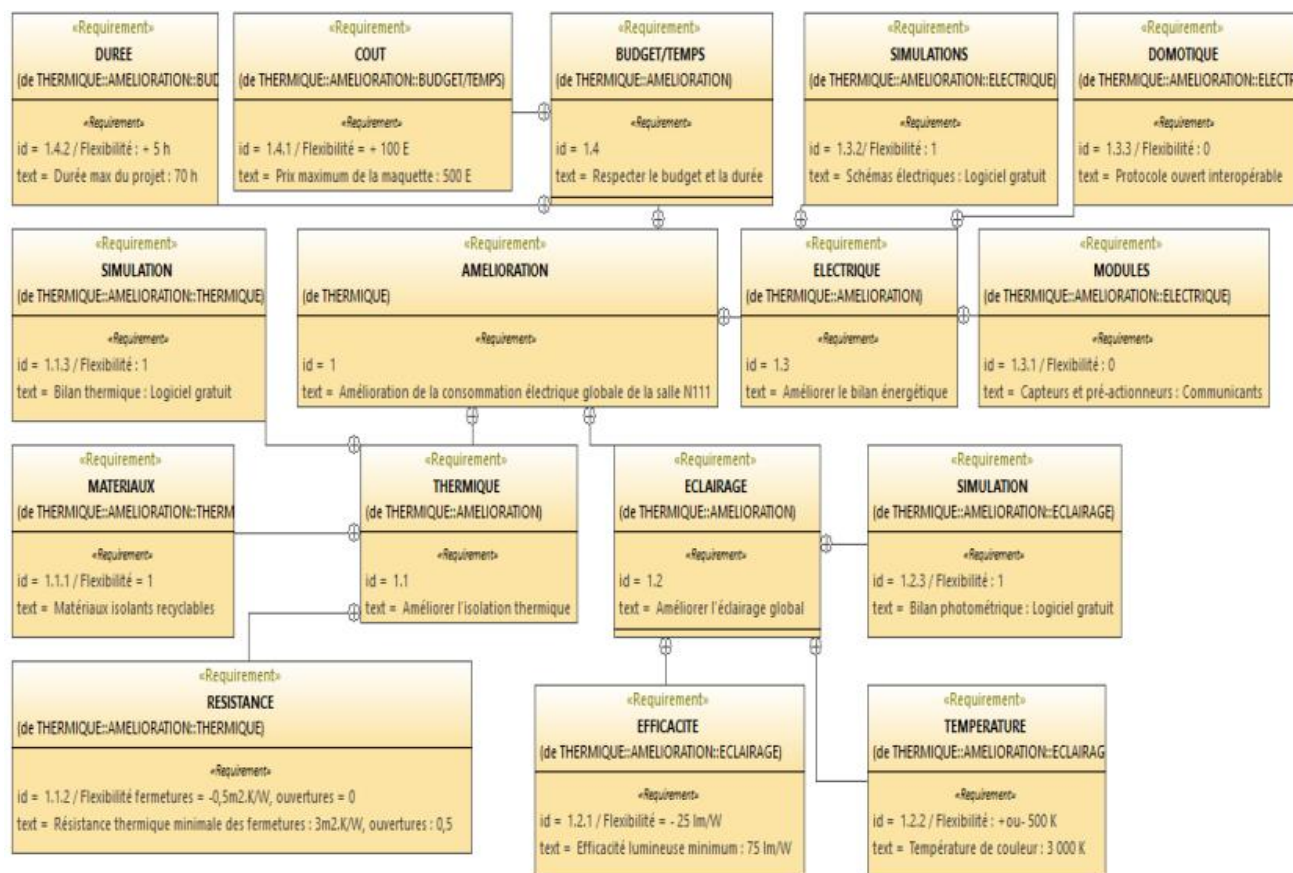


Figure 4 : Diagramme des exigences du hangar pédagogique fait sur VISUAL PARADIGM

Par la suite, l'équipe concernée par le projet doit réfléchir, lors de la séance 2, à des premières solutions répondant à la demande du CDC, et ce tout d'abord sous forme d'une approche en brainstorming ou « remue-méninge ». Vient ensuite la phase de divergence permettant à chaque élève de proposer diverses idées, entendues même si elles paraissent farfelues afin de ne pas les brider, ainsi que de lister leurs différents avantages et inconvénients, contraintes puis limites. Suivra enfin celle de convergence à la séance 3, afin d'aboutir entre 1 à 3 ébauches de solutions qui doivent être exposées et argumentées par chaque élève de l'équipe lors de la première revue de projet. En effet, à l'issue de cette dernière, ils doivent justifier le choix de chacune des solutions proposées. Enfin, la séquence se termine par une analyse de la faisabilité de ces solutions et la préconisation d'une solution réaliste afin de guider le groupe vers une réalisation concrète, évitant toute frustration.

Les fiches des séquences 2, 3 et 4 présentées ci-dessous (voir figures 5, 6, 7) concernent le projet cité plus haut, et fixent les objectifs opérationnels des trois séances qui les constituent, les compétences visées, ainsi que la répartition de leur dotation horaire globale :

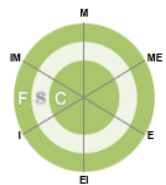
Objectifs opérationnels des séances de la 2^{ème} séquence : Séance 1 : Analyser le besoin client avec interprétation de sa demande. Séance 2 : Proposer plusieurs solutions en réponse à ce besoin. Séance 3 : Choisir une solution unique parmi elles en la justifiant.										Quelles sont les différentes solutions répondant à la problématique de réalisation de la maquette du hangar ?			
Pistes d'évaluation : Evaluation formative par la Revue 1, tout d'abord collective car elle accompagne et encadre l'équipe "projet" par une orientation à prendre en cas de perte des objectifs imposés. Enfin elle aussi individuelle car elle va évaluer aussi l'ensemble des performances de chaque élève, et donc l'acquisition des compétences associées à la séquence.										ENSEIGNEMENT DE SPECIALITE			
										AC : ☒	ITEC : ☐	SIN : ☐	EE : ☒
Situation dans la progression	1 ^{ère}	○○○○○	○○○○○	○○○○○	○○○○○	○○○○○	○○○○○	Durée : 2 semaines	EFFECTIF ELEVES		NOMBRE D'HEURES	NOMBRES D'ELEVES PAR GROUPE	
	Tale	○○○○○	○○○○○	○○○○○	○○○○○	○○○○○	○○○○○		1/2 groupe	16 élèves			
									Nombre de groupes : 4	12	4		
Travail interdisciplinaire :	Collègue de Français afin de les aider à bien interpréter le CDC pédagogique.								Compétences visées par la séquence : CO1.2. Justifier le choix d'une solution selon des contraintes d'ergonomie et de design. CO1.3. Justifier les solutions constructives d'un produit au regard des performances environnementales et estimer leur impact sur l'efficacité globale. CO5.5. Proposer des solutions à un problème technique identifié en participant à des démarches de créativité, choisir et justifier la solution retenue.				
													
	Ressources												
	Séance 1	Salle de mutualisation du laboratoire STI2D configurée en mode projet. 1 PC de cette salle, connecté à internet. Tableau + Vidéoprojecteur.											
Séance 2	IDEM												
Séance 3	1 PC de la salle d'îlots, connecté à internet. Tableau de comparaison des avantages et inconvénients des différentes solutions trouvées, placé dans leur classeur numérique.												
Séance 1	Question directrice	Activités (professeur + élèves)				Attendus à l'issue de la séance			Durée	Elèves	Îlots		
	Comment analyser le besoin client avec interprétation de sa demande ?	Analyse du besoin exprimé par le cahier des charges à travers son analyse SYSML afin de bien interpréter la demande "client", et les exigences associées. Ceci pour bien y répondre sans fausse note afin d'éviter de faire un hors sujet.				L'équipe doit être capable de comprendre la demande fonctionnelle du client avec les exigences associées, afin de bien l'interpréter pour concevoir par la suite un produit acceptable, répondant au cahier des charges pédagogique.			3 h	16	4		
Séance 2	Question directrice	Activités (professeur + élèves)				Attendus à l'issue de la séance			Durée	Elèves	Îlots		
	Comment proposer plusieurs solutions en réponse à ce besoin ?	Proposition, en phase de divergence (ou phase irrationnelle), de diverses idées de solutions en réponse au besoin du CDC, et ce par chaque élève.				L'équipe doit comprendre les avantages liés à une proposition désorganisée et divergente de solutions même irrationnelles dans un projet, afin de balayer tout le spectre possible et imaginable en réponse à son besoin.			3 h	16	4		
Séance 3	Question directrice	Activités (professeur + élèves)				Attendus à l'issue de la séance			Durée	Elèves	Îlots		
	Comment choisir une solution unique en la justifiant ?	Liste des différents avantages et inconvénients de toutes les solutions de la séance 2, leurs contraintes et leurs limites. Suivra ensuite la phase de convergence afin de statuer sur une solution finale, viable et réalisable dans le contexte du projet, et ce en les comparant.				Le groupe doit être capable de choisir selon lui la meilleure solution à la problématique du projet, et ce en argumentant son choix afin de la concevoir à la séance suivante. Une présentation orale permettra de la communiquer.			5h + 1h pour la revue 1 avec 15 mn par groupe	16	1		

Figure 5 : Déroulé de la séquence 2 du premier projet

c) Séquence 3 : Conception de la maquette numérique, ainsi que son prototype (dotation horaire : 30 heures)

Cette séquence (figure 6), jalonnée par une deuxième revue d'évaluation, a pour objectif, comme toute phase d'avant-projet, de pré-étudier la solution retenue et de s'organiser de façon à pouvoir la réaliser par la suite à travers une maquette. Ainsi la première séance permet de concevoir de façon préliminaire la solution retenue en définissant globalement la structure matérielle et les composants électriques permettant de réaliser réellement cette maquette qui va modéliser de façon réduite le hangar.

En effet, la première définition est faite par deux élèves d'approfondissement « Architecture et Construction » (AC) de l'équipe, alors que la seconde par deux autres d'« Energie et Environnement » (EE). Lors de la séance 2, la conception détaillée qui vient ensuite doit se baser sur une ou plusieurs modélisations structurelles et thermiques par les élèves de AC, et électriques par ceux de EE, à l'aide de logiciels de simulation dédiés. Cette démarche permet de vérifier si les matériaux architecturaux et les modules électromécaniques choisis respectent la demande et les exigences du cahier des charges pédagogique avant leur dimensionnement et leur commande lors de la séance 3. Enfin, cette dernière consiste en un inventaire des commandes réalisées afin de

vérifier l'adéquation entre les spécificités techniques désirées et celles reçues, et corriger dans le cas contraire.

Cette séquence se clôture par une réunion entre l'équipe et l'enseignant afin de suivre l'état d'avancement du projet, formant ainsi la revue 2.

Objectifs opérationnels des séances constitutives de la 3 ^{ème} séquence :										Comment concevoir une maquette du hangar avant sa réalisation ?							
Séance 1 : Définir la structure matérielle et les composants permettant de réaliser la maquette.										ENSEIGNEMENT DE SPECIALITE :							
Séance 2 : Modéliser de façon multi-physique la maquette grâce à des logiciels de simulation.										AC : ☒	ITEC : ☐	SIN : ☐	EE : ☒				
Séance 3 : Commander le matériel pour la réalisation de la maquette du hangar.																	
Pistes d'évaluation : Comme la revue 1, la revue 2, positionnée aussi à la fin de la séquence, permet encore une évaluation à la fois formative et collective. J'inviterais bien dans ce cadre un de mes collègues de l'approfondissement Architecture et Construction (AC) à coévaluer avec moi l'ensemble des performances de chaque élève, afin de valider l'acquisition des compétences visées plus bas.																	
Situation dans la progression	1 ^{ère}	00000	00000	00000	00000	00000	00000	00000	00000	Durée : 3 semaines	EFFECTIF ELEVES		NOMBRE D'HEURES	NOMBRES D'ELEVES PAR GROUPE			
	Tale	00000	00000	00000	00000	00000	00000	00000	00000		1/2 groupe	16 élèves	30	4			
Travail interdisciplinaire : Collègue de AC afin d'aider les 2 élèves de cet approfondissement dans la réalisation de leurs tâches, ainsi que m'aider à coévaluer la revue 2.										Compétence visée par la séquence : CO1.1. Justifier les choix des structures matérielles et/ou logicielles d'un produit, identifier les flux mis en œuvre dans une approche de développement durable. CO3.1. Identifier et caractériser les fonctions et les constituants d'un produit ainsi que ses entrées/sorties CO4.1. Décrire une idée, un principe, une solution, un projet en utilisant des outils de représentation adaptés. CO5.8. Concevoir CO6.1. Expliquer des éléments d'une modélisation multiphysique proposée relative au comportement de tout ou partie d'un produit.							
Ressources																	
Séance 1										Salle de mutualisation du laboratoire STI2D configurée en mode projet. PC de cette salle, connecté à un internet. Tableau + Vidéoprojecteur.							
Séance 2										Fiches d'accompagnement des logiciels utilisés. PC du laboratoire STI2D organisés en îlots, connectés au réseau du lycée et à internet.							
Séance 3										IDEM							
Séance 1	Question directrice		Activités (professeur + élèves)				Attendus à l'issue de la séance				Durée	Elèves	Îlots				
	Comment définir les matériaux électromécaniques formant la future maquette ?		Liste des différents matériaux structurels (par les 2 étudiants de AC) et électriques (par ceux de EE) pouvant composer la future maquette, avec leurs contraintes et leurs limites. Suivra ensuite la phase de leur choix argumenté, avant sa validation logicielle lors de la séance 2.				Chaque équipe de projet doit être capable d'identifier différentes solutions à leur maquette, et de sélectionner les meilleures pour les simulations multi-physiques qui vont suivre lors de la prochaine séance.				6 h	16	4				
Séance 2	Question directrice		Activités (professeur + élèves)				Attendus à l'issue de la séance				Durée	Elèves	Îlots				
	Comment modéliser numériquement les aspects importants de la maquette ?		Conception détaillée se basant sur plusieurs modélisations multi-physiques : Structurelles et thermiques par les 2 élèves de AC, et électriques puis informatiques par ceux de EE. Ils devront utiliser en support à leurs dimensionnements des logiciels de simulation.				Chaque équipe doit vérifier si les matériaux architecturaux et les modules électromécaniques choisis permettent de respecter la demande et les exigences du cahier des charges pédagogique, et ce avant leur dimensionnement et commande lors de la séance 3.				18 h	16	4				
Séance 3	Question directrice		Activités (professeur + élèves)				Attendus à l'issue de la séance				Durée	Elèves	Îlots				
	Comment commander et vérifier sa conformité en effectuant un inventaire ?		Dimensionnement et commande de tous les modules électromécaniques simulés lors de la séance 2. Un inventaire des commandes réalisées devra être effectué afin de vérifier l'adéquation entre les spécificités techniques désirées et celles reçues.				Chaque groupe doit vérifier l'adéquation de sa commande de matériel avec les services attendus, et ce avant son utilisation en phase de réalisation de la maquette réelle.				5h + 1h pour la revue 2 avec 15 mn par groupe	16	4				

Figure 6 : Déroulé de la séquence 3 du premier projet

d) Séquence 4 : Tests, mesures des écarts avec le CDC et proposition d'amélioration (durée indicative : 21 heures)

Cette dernière séquence, finalisée par l'ultime revue de projet, permet de réaliser concrètement la maquette répondant au diagramme des exigences fonctionnelles du cahier des charges pédagogique lors de la séance 1. La séance 2 est l'occasion pour chaque équipe de définir un protocole de tests, d'essais et de mesures sur cette maquette avant sa mise en œuvre afin de valider ou non les résultats réels obtenus en comparant leurs écarts avec ceux correspondants aux différentes simulations logicielles réalisées lors de la conception du projet. La correspondance entre les comportements réels et simulés de la maquette du hangar, associée à l'analyse de leurs écarts de performance, permet de valider cette dernière phase du projet avant son évaluation formative lors de la revue 3. Enfin, la séance 3 permet la préparation individuelle de chaque

membre d'une équipe à la présentation, lors du jury final du « grand oral » de BAC STI2D, d'un centre d'intérêt du projet choisi par chaque élève.

Ainsi cette dernière séance est l'une des plus importantes car elle prépare chaque élève/candidat à son évaluation finale de fin d'année (vers mi-juin de l'année en cours) sous la forme d'une présentation pendant le « grand oral ». Cette préparation consiste en deux étapes :

- Participation à la construction et à la finalisation du rapport personnel de projet de chaque élève décrivant par écrit ses réalisations lors de ses quatre phases (organisation, pré-étude, conception et mise en œuvre). Une aide lui est attribuée pour la rédaction en lui donnant la structuration de ses parties introduction, développement, conclusion et annexes. Un dossier technique est aussi demandé à chaque groupe contenant les résultats de leurs différentes simulations, des schémas électriques et des plans architecturaux.
- Aide à la préparation orale de la soutenance du projet en incitant chaque élève à présenter ses réalisations personnelles en les décrivant oralement. Ainsi, en lui laissant le choix guidé de la forme, il faut juste le conseiller sur son expression orale et la clarté de ses explications, en mettant en valeur ses réalisations dans le respect de la langue française et des attendus de l'épreuve de restitution finale. Il faut aussi s'assurer que chaque élève a bien réalisé toutes les tâches qui lui incombent.

Objectifs opérationnels des séances constitutives de la 4 ^{ème} séquence :										Comment tester la réalisation produite et valider sa réponse au CDC pédagogique ?	
Séance 1 : Réaliser concrètement la maquette modélisée lors de la séquence précédente. Séance 2 : La valider en comparant ses performances aux exigences fonctionnelles du CDC pédagogique. Séance 3 : Présenter oralement les travaux individuels et collectifs de chaque équipe "projet". Pistes d'évaluation : Revue 3 de projet qui est la plus importante car elle prépare chaque élève de l'équipe à l'évaluation certificative de fin d'année, et ce sous forme d'une présentation orale du travail réalisé aux autres équipes.										ENSEIGNEMENT DE SPECIALITE :	
AC : ☒ ITEC : ☐ SIN : ☐ EE : ☒											

Situation dans la progression		1ère		2ème		3ème		4ème		Durée :		EFFECTIF ELEVES		NOMBRE D'HEURES		NOMBRES D'ELEVES PAR GROUPE	
Tale	Rentrée	00000	00000	00000	00000	00000	00000	00000	00000	3 semaines	16 élèves	4	21	4			
	Fin	00000	00000	00000	00000	00000	00000	00000	00000								

Travail interdisciplinaire :		Compétences visées par la séquence :	
Collègues de AC et de Français pour des entraînements oraux de préparation aux soutenances pour l'évaluation certificative des élèves en fin d'année.		CO4.3. Présenter de manière argumentée des démarches, des résultats, y compris dans une langue étrangère. CO6.3. Évaluer un écart entre le comportement du réel et les résultats fournis par le modèle en fonction des paramètres proposés, conclure sur la validité du modèle. CO7.1. Réaliser et valider un prototype ou une maquette obtenue en réponse à tout ou partie du cahier des charges initial. CO7.2. Mettre en œuvre un scénario de validation devant intégrer un protocole d'essais, de mesures et/ou d'observations sur le prototype ou la maquette, interpréter les résultats et qualifier le produit. CO7.3. Expérimenter sur des ouvrages ou des maquettes physiques simplifiées et instrumentées pour étudier l'usage ou le comportement d'un ouvrage réel ou celui d'éléments constitutifs et valider des choix techniques.	

Ressources		
Séance 1	Salle de mutualisation du laboratoire STI2D configurée en mode projet. PC de cette salle, connecté à un internet. Tableau + Vidéoprojecteur.	
Séance 2	Fiches d'accompagnement sur la question. PC du laboratoire de STI2D organisés en îlots, connectés au réseau du lycée et à internet.	
Séance 3	Salle de mutualisation du laboratoire STI2D configurée en mode projet. Tableau + Vidéoprojecteur.	



Séance 1	Question directrice	Activités (professeur + élèves)	Attendus à l'issue de la séance	Durée	Elèves	Îlots
	Comment monter la maquette du hangar ?	Réalisation concrète de la maquette du hangar répondant aux différentes exigences du cahier des charges pédagogique.	Chaque équipe doit être capable de se répartir les tâches : Sa structure matérielle sera faite par les 2 étudiants de AC, son équipement électronique et informatique par ceux de la spécialité EE.	9 h	16	4
Séance 2	Question directrice	Activités (professeur + élèves)	Attendus à l'issue de la séance	Durée	Elèves	Îlots
	Comment tester et valider la maquette ?	Définition d'un protocole de tests, d'essais et de mesure sur cette maquette avant sa mise en œuvre, afin de valider ou non les résultats réels obtenus en comparant leur écart avec ceux correspondant aux différentes simulations logicielles faites lors de la conception du projet.	Chaque groupe doit faire une correspondance entre les comportements réels et simulés de la maquette, avec l'analyse de leurs écarts de performance, permettant la validation de cette dernière phase du projet avant son évaluation finale.	6 h	16	4
Séance 3	Question directrice	Activités (professeur + élèves)	Attendus à l'issue de la séance	Durée	Elèves	Îlots
	Comment présenter oralement le travail effectué lors du projet ?	Participation à la construction et à la finalisation des présentations personnelles et collectives des travaux du groupe décrivant ses réalisations lors des 3 phases précédentes du projet (pré-étude et organisation, conception et mise en œuvre).	Chaque membre de l'équipe doit être capable de montrer qu'il a bien effectué les tâches de son contrat, et d'argumenter les différents choix qu'il a été amené à faire dans la réalisation de sa partie du projet pédagogique.	3h + 3h pour la revue 3 avec 45 mn par groupe	16	1

Figure 7 : Déroulé de la dernière séquence du premier projet

1.2 - Evaluations de l'acquisition des compétences visées et présentation d'un attendu (voir aussi annexes 2, 3, 4 [9])

a) Les trois revues de projet et l'évaluation finale

Ces revues, positionnées à la fin des séquences 2, 3 et 4, permettent des évaluations à la fois collectives et formatives (même si la dernière peut être considérée comme sommative). En effet, elles évaluent, mais accompagnent aussi et encadrent par une réorientation en cas de perte des objectifs imposés aux élèves. Suit enfin la vérification de la validation des compétences associées aux tâches à effectuer dans les différentes phases du projet, dont le contrat individuel se trouve en annexe 1 [9]. Ces compétences sont évaluées par l'observation du comportement de chaque élève pendant le déroulement du projet et par le constat de la bonne réalisation des tâches associées lors de ses trois revues.

En effet, celles-ci consistent à réunir l'équipe « projet » composée de quatre élèves (2 EE + 2 AC) autour d'une table du laboratoire de BAC STI2D. La relation en tant qu'éducateur avec l'ensemble des élèves ne doit pas être de type « enseignant interrogateur » face à des « candidats interrogés », mais plutôt de type « collaborateur » effectuant et réussissant ensemble une réalisation finale. Les revues doivent être une continuité du temps de projet qui n'est pas interrompu, les autres groupes travaillant sur le leur en toute autonomie.

Ainsi, la posture de l'enseignant ne doit pas le positionner en personne détenant un savoir supérieur, mais plutôt en guide ou « coach » permettant de canaliser le pouvoir créatif des élèves. Il doit profiter des différentes interventions des élèves lui présentant leurs productions pour les évaluer, sans soucis de formalisme. L'important est qu'ils démontrent au professeur la bonne réalisation des tâches qui leur incombent et la bonne atteinte de leurs objectifs opérationnels et s'assurer du bon aboutissement du projet et de la construction du dossier contenant la contribution de chaque élève. Enfin, il s'agit d'un pilotage continu où chaque élève doit avoir connaissance des compétences et des indicateurs de performance sur lesquels il va être évalué. En revanche, les notes obtenues aux revues de projet à travers la fiche d'évaluation individuelle (voir l'annexe 3 [9]) ne sont pas communiquées. Par ailleurs, quatre étapes importantes ponctuent ces revues qui réunissent à chaque fois l'ensemble de l'équipe projet :

- La préparation de la revue : le rôle de l'enseignant est de commanditer le projet, et de préciser à chaque élève de l'équipe pendant la séance 2 qui la précède, les modalités et contenu des échanges qui vont avoir lieu.
- Conduite de la revue : à la séance 3, 15 minutes sont consacrées à chaque équipe, pendant lesquelles les élèves exposent à tour de rôle leur travail donnant lieu à des échanges afin de justifier leurs différents choix, ainsi que d'approfondir certains points encore flous.

- Conclusion : il s'agit de donner une nouvelle orientation au projet si ce dernier venait à aller dans une mauvaise direction ou le recadrer pour valider la poursuite des travaux. Le professeur peut aussi faire le point avec chaque équipe sur la répartition des tâches.
- L'évaluation : une fois la revue terminée, en dehors de la présence des élèves, l'enseignant renseigne la grille d'évaluation de l'annexe 3 [9].

Enfin, l'évaluation finale qui se fait dans le cadre du « grand oral » se veut plutôt individuelle et certificative car elle consiste à répondre à une question choisie par chaque élève en rapport avec le projet à un jury final. Ce dernier doit valider l'acquisition des compétences du référentiel de BAC STI2D. Cette épreuve se veut aussi formelle, car elle doit aussi évaluer la capacité de chaque candidat à présenter et à défendre l'ensemble de son travail durant les 8 semaines du projet et à justifier l'ensemble des choix qu'il a entrepris. Ainsi, il doit réaliser une présentation qui dégage l'essentiel des éléments clés figurant dans son dossier.

Cette soutenance dure 20 minutes au total, en se clôturant par 10 minutes de questions/réponses afin que le candidat éclaircisse les points peu clairs de sa présentation. C'est aussi l'occasion d'échanger sur le travail qu'il a effectué avec ses réussites et faiblesses, faire un point sur l'atteinte des objectifs, ainsi que conclure sur l'aboutissement du projet et sa continuité.

b) Réponse aux sous-exigences du diagramme SYSML

La maquette correspondant au livrable présenté à la figure 1 répond quasiment à toutes les sous-exigences (à la flexibilité près) du diagramme SYSML de la figure 4. La réponse est résumée dans le tableau de la figure 8 :

EXIGENCES	SOUS-EXIGENCES	VALIDATIONS DE LA SOUS-EXIGENCE
THERMIQUE (id = 1.1 : Isolation thermique)	MATERIAUX (id = 1.1.1)	Le polyuréthane et le bois MDF sont bien des matériaux recyclables => Exigence vérifiée
	RESISTANCE THERMIQUE (id = 1.1.2)	Ces matériaux ont une conductivité thermique respectivement d'environ $0,025 \text{ W.m}^{-1}.\text{K}^{-1}$ et $0,014 \text{ W.m}^{-1}.\text{K}^{-1} < 0,1 \text{ W.m}^{-1}.\text{K}^{-1}$ => Exigence vérifiée
	SIMULATION THERMIQUE (id = 1.1.3)	Utilisation du logiciel REVIT, gratuit pour le monde de l'éducation => Exigence vérifiée
ECLAIRAGE (id = 1.2 : Eclairage global)	EFFICACITE LUMINEUSE (id = 1.2.1)	L'efficacité lumineuse des 6 LED hautes intensités installées est de $63 \text{ lm/W} > 75 - 25 = 50 \text{ lm/W}$ => Exigence vérifiée avec la flexibilité imposée
	TEMPERATURE DE COULEUR (id = 1.2.2)	La température de couleur de ces luminaires est de 3000 K. => Exigence vérifiée
	SIMULATION PHOTOMETRIQUE (id = 1.2.3)	Utilisation du logiciel gratuit DIALUX EVO => Exigence vérifiée
ELECTRIQUE (id = 1.3 : Bilan électrique)	MODULES ELECTRIQUES (id = 1.3.1)	Capteurs et pré-actionneurs gérés par le microcontrôleur ATMEGA 328 de l'environnement ARDUINO. => Exigence vérifiée
	SCHEMAS ELECTRIQUES (id = 1.3.2)	Utilisation du logiciel AUTOCAD Electrical, gratuit pour le monde de l'éducation. => Exigence vérifiée
	ASPECTS DOMOTIQUES (id = 1.3.3)	Utilisation de l'environnement ARDUINO avec son compilateur ouvert => Exigence vérifiée
BUDGET/ TEMPS (id = 1.4)	BUDGET (id = 1.4.1)	Le coût de la maquette est de 150 euros < 500 euros exigés => Exigence vérifiée
	TEMPS (id = 1.4.2)	La durée du projet est de 100 heures > 72 h => Exigence non vérifiée car non testée

Figure 8 : Tableau résumant la satisfaction aux sous-exigences du diagramme SYSML du premier projet pédagogique

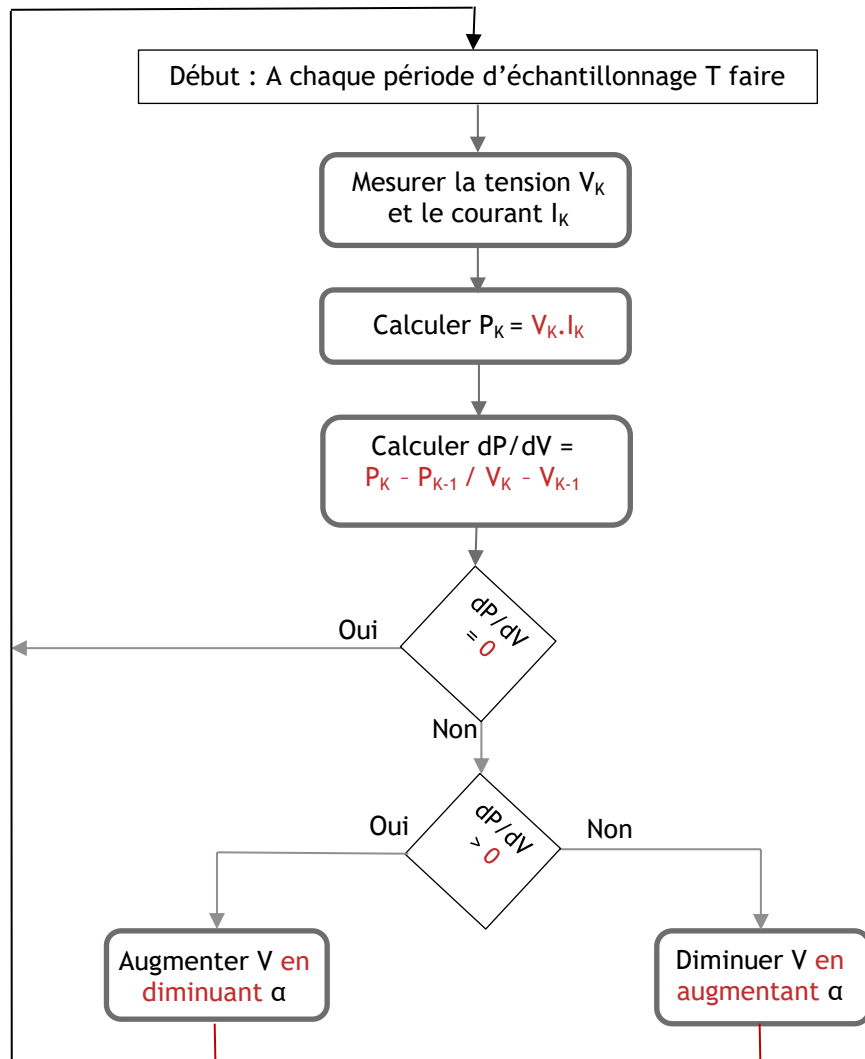
2 - Exploitation pédagogique en démarche de résolution de problèmes pour un BUT GEII

La seconde exploitation pédagogique du support technique cible une section de BUT GEII, parcours « Electricité et maîtrise de l'énergie », contenant 15 étudiants. La démarche consiste à résoudre une problématique technique d'optimisation de l'énergie fournie par des modules PV à un réseau grâce à un onduleur. Pour ce faire, une séquence contenant quatre séances de 4 heures chacune est proposée (voir figure 9), répondant à un besoin spécifique d'optimisation d'une installation photovoltaïque, en complétant et testant un modèle MATLAB avec un programme P&O (Perturbe & Observe), puis en l'implémentant dans l'onduleur d'une vraie installation afin de le valider (voir annexe 7 [9]).

2.1 - Détails de la séquence

Titre de la séquence :		Comment résoudre un problème d'optimisation de l'énergie injectée par une source photovoltaïque sur le réseau ?						GEII parcours « Electricité et maîtrise de l'énergie »							
Contenu de la séquence : Onduleur photovoltaïque en fonctionnement pour un site raccordé au réseau								PREREQUIS							
MATIERE		RESSOURCE		ACQUI VISE		COMPETENCES VISEES		- Algorithmique et programmation par bloc ou script - Installation photovoltaïque : Schéma simplifié (module, batterie, charge)							
Energie spécialisée		R4.EME.07		Évaluer la performance d'une installation photovoltaïque		- Assurer le maintien en condition opérationnelle d'un système - Concevoir la partie GEII d'un système - Vérifier la partie GEII d'un système									
Situation dans la progression								Durée		Approche pédagogique					
1ère	Rentrée	XXXXXX	Toussaint	XXXXXX	Noël	XXXXXX	Hiver	XXXXXX	Printemps	XXXXXX	Été	16/45 heures TP	DEDUCTIVE	INDUCTIVE	X
2ème		XXXXXX		XXXXXX		XXXXXX		XXXXXX		XXXXXX					
3ème		XXXXXX		XXXXXX		XXXXXX		XXXXXX		XXXXXX					
Contexte et problématique :		Un site raccordé au réseau, formé d'un hangar d'agriculteur, est alimenté par un panneau photovoltaïque à travers un onduleur. Mais ce dernier n'arrive pas à suivre le point maximal de puissance lorsque l'éclairement du panneau évolue. Vous êtes ainsi en charge de permettre cette poursuite en y implantant l'algorithme P&O.										Semestre : 4			
Objectifs opérationnels des 4 séances (4x4 h) :		• Valider le dimensionnement (caractéristiques électriques et nombres en série et parallèle) des modules, ainsi que l'onduleur de l'installation photovoltaïque • Constater grâce à des mesures que la poursuite MPPT (Maximal Power Point Tracking) ne s'effectue pas avec l'onduleur après son montage • Ecrire l'algorithme P&O de cette traque, et l'implémenter par la suite dans le microcontrôleur de l'onduleur • Mettre en place cette poursuite, la tester et la valider										Séquence n°14			
Types d'activité (élèves + Professeur)		Attendus à l'issue de l'activité						Supports		Nb postes	Nb élèves par poste	Durée (h)			
Séance 1		Présentation générale à chaque équipe de 3 élèves de leur îlot et du travail attendu à l'issue des 4 séances de TP en leur présentant les objectifs opérationnels.						PC + vidéoprojecteur		1	15	0,5			
		Validation du choix des modules en fonction de la puissance installée dans le hangar.						Systèmes constitués de modules, les IGBT d'un onduleur non montés, et des charges		5	3	1,5			
		Validation des caractéristiques électriques de l'onduleur grâce à sa structure de puissance en IGBT.						IDEM		5	3	2			
Séance 2		Montage et câblage de toute l'installation (modules, onduleur avec sa structure de puissance formée d'IGBT, et charges modélisant celles du hangar réel).						Les systèmes précédents, mais à monter et à connecter au réseau		5	3	2,5			
		Rappel du principe mathématique de la poursuite MPPT, et constatation que cette dernière ne s'opère pas grâce à des mesures précises.						Les systèmes précédents montés et connectés au réseau		5	3	1,5			
Séance 3		Ecriture de l'algorithme P&O grâce à des blocs						PC avec un logiciel de génération d'algorithmes		15	15	1			
		Implémentation de cette algorithme grâce au script du modèle MATLAB Simscape fourni de l'installation						PC avec le logiciel MATLAB		15	15	3			
Séance 4		Test de ce programme dans le modèle et ensuite réellement grâce à la commande directe des IGBT						PC avec MATLAB et des cartes dSPACE		15	15	3			
		Synthèse à toute la classe avec structuration et restitution organisées de connaissance sur les travaux effectués sur chaque système, et ce afin de consolider les savoirs et les compétences associés.						PC + vidéoprojecteur		1	15	1			
Evaluation sommative		Compte rendu des 4 travaux pratiques menés lors des séances. En effet, un énoncé de TP est donné en document d'accompagnement afin de les guider dans leur démarche de résolution de problèmes.						ENONCE DE TP DONNE EN DOCUMENT D'ACCOMPAGNEMENT SUIVANT UNE DEMARCHE DE RESOLUTION DE PROBLEMES		1	15				

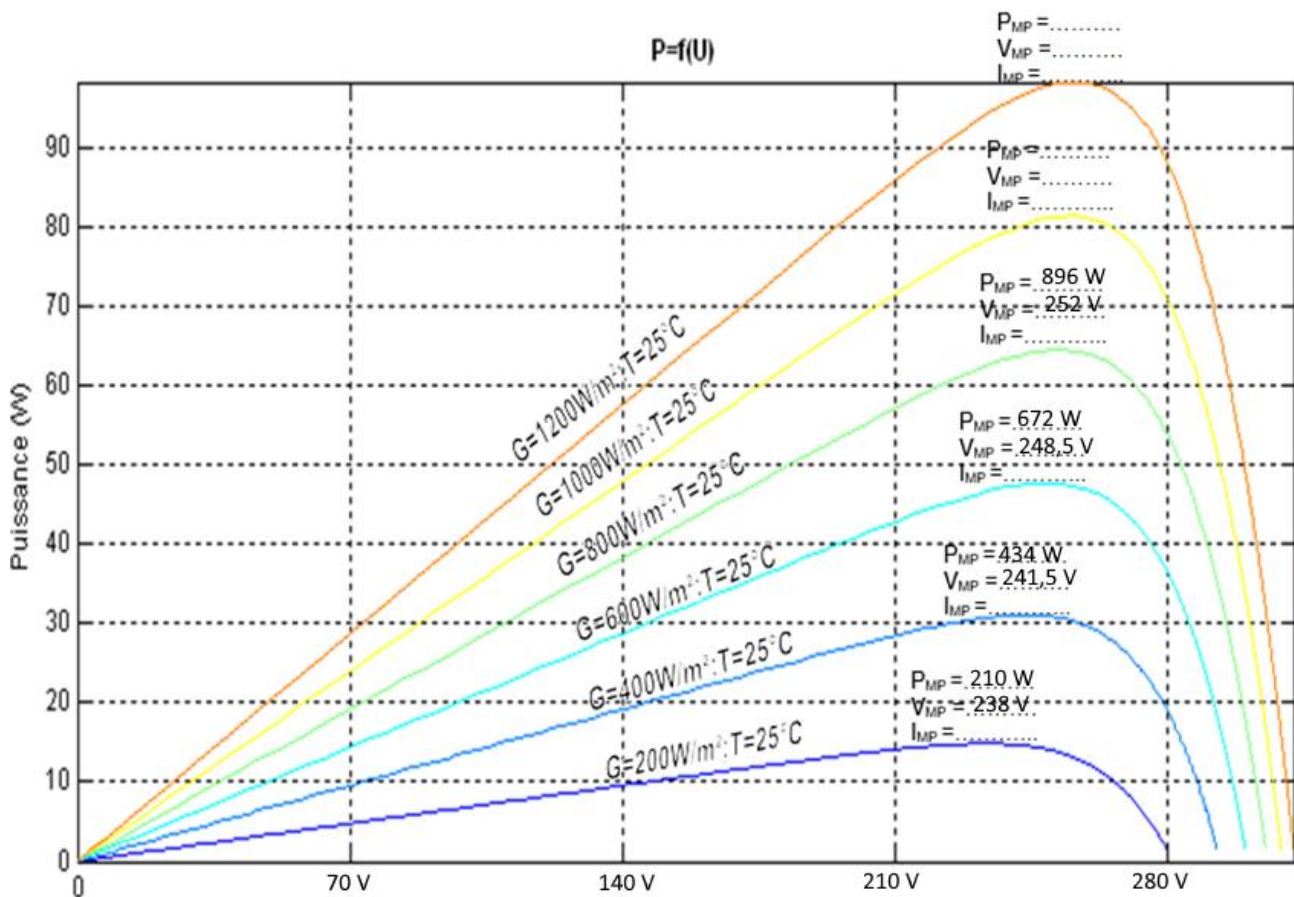
Figure 9 : Tableau présentant les contenus et attendus des différentes séances de la séquence



Par la suite, pour chaque niveau d'éclairement, il relève la puissance P délivrée par le champ PV en amont du hacheur « Boost », ainsi que la tension V_s correspondante, puis complète le tableau suivant :

E (W/m ²)	200	400	600	800	1 000	1 200
V _s (V)	251	254	255	253	248	242
P (W)	238	482	723	952	1 179	1 399

Enfin, les étudiants doivent vérifier que chacun de ces points de fonctionnement se situe bien au MPP (Maximal Power Point) de chaque caractéristique $P = f(V_s)$ d'un module BP 585 pour différentes irradiances, et ce afin de statuer si l'optimisation MPPT précédente est effectivement efficace :



En conclusion, cette exploitation pédagogique a permis de valider, dans une démarche de résolution de problèmes, les compétences suivantes de BUT GEII :

- assurer le maintien en condition opérationnelle un système ;
- concevoir la partie GEII d'un système ;
- vérifier la partie GEII d'un système.

3 - Exploitation pédagogique en démarche scientifique dans le cadre d'une CPGE PTSI

La dernière exploitation pédagogique cible une demi-classe de CPGE PTSI, soit 16 élèves. Elle se positionne dans la démarche scientifique, visant à évaluer les écarts entre des performances simulées et mesurées dans le cas d'optimisation d'une production électrique d'une source à énergie renouvelable. En effet, la démarche scientifique permet de préparer les élèves à l'adaptabilité, à la créativité, et à la communication de leurs résultats d'expérience, compétences nécessaires dans les métiers d'ingénierie, de recherche, ou d'enseignement qu'ils sont susceptibles d'exercer dans leur vie future. Enfin, cette approche, très variée, balaye comme on le verra plusieurs compétences du référentiel CPGE de PTSI.

3.1 - Description détaillée de la séquence

La figure 11 qui suit détaille le plan de la séquence en démarche scientifique proposée précédemment :

Titre de la séquence :		Comment optimiser la production électrique d'une source à énergie renouvelable ?				Physique, Technologie et Sciences de l'Ingénieur																																																																																																							
Objectif de la séquence : Evaluer les écarts d'optimisation de production entre une source simulée et réelle						Pré-requis																																																																																																							
ANALYSER		Ch	MODELISER		Ch	EXPERIMENTER		Ch	COMMUNIQUER		Ch																																																																																																		
Compétence A3 : Analyser l'organisation fonctionnelle et structurelle. - Associer les fonctions aux constituants - Identifier et décrire les chaînes fonctionnelles du système		Compétence B1 : Choisir les grandeurs physiques et les caractériser. - Identifier les grandeurs d'entrée et de sortie d'un modèle - Identifier les paramètres d'un modèle		Compétence D1 : Mettre en œuvre un système. - Mettre en œuvre un système en suivant un protocole - Repérer les constituants réalisant les principales fonctions des chaînes fonctionnelles		Compétence E1 : Rechercher et traiter des informations. - Rechercher des informations - Trier les informations selon des critères		Compétence E2 : Produire et échanger de l'information. - Faire preuve d'écoute et confronter des points de vue - Présenter de manière argumentée une synthèse des résultats - Utiliser un vocabulaire technique, des symboles et des unités adéquats		* Commande MLI. Hacheurs * Conversion d'énergie * Schémas bloc sur MATLAB Simulink																																																																																																			
Compétence A4 : Analyser les performances et les écarts. - Caractériser les écarts entre les performances - Interpréter et vérifier la cohérence des résultats obtenus expérimentalement, analytiquement ou numériquement - Rechercher et proposer des causes aux écarts constatés		Compétence B2 : Proposer un modèle de connaissance et de comportement. - Compléter un modèle multiphysique - Associer un modèle aux composants des chaînes fonctionnelles - Modéliser les convertisseurs statiques d'énergie		Compétence D2 : Proposer et justifier un protocole expérimental. - Choisir le protocole en fonction de l'objectif visé - Choisir la grandeur physique à mesurer ou justifier son choix - Justifier le choix d'un capteur ou d'un appareil de mesure vis-à-vis de la grandeur physique à mesurer		Compétence D3 : Mettre en œuvre un protocole expérimental - Mettre en œuvre un appareil de mesure adapté à la caractéristique de la grandeur à mesurer - Identifier les erreurs de mesure																																																																																																							
Thème de la séquence Modéliser un système, expérimenter et effectuer des mesures sur sa version réelle afin d'évaluer les performances de sa chaîne d'énergie Analyser A3A4 Modéliser B1B2B3 Compétences ExpérimenterD1D2D3CommuniquerE1E2 A RIS S M <table><tr><th colspan="10">Situation dans la progression</th><th colspan="2">Durée</th><th colspan="2">Approche pédagogique</th></tr><tr><td>1ère</td><td>Reentrée</td><td>XXXXXX</td><td rowspan="2">Tous les</td><td>XXXXXX</td><td>Noël</td><td>XXXXXX</td><td>Hiver</td><td>XXXXXX</td><td>Printemps</td><td>XXXXXX</td><td>Été</td><td>8</td><td>Heures</td><td>DEDUCTIVE</td><td>INDUCTIVE</td><td>X</td></tr><tr><td>2ème</td><td></td><td>XXXXXX</td><td>XXXXXX</td><td></td><td>XXXXXX</td><td></td><td>XXXXXX</td><td></td><td>XXXXXX</td><td></td></tr></table> Objectifs opérationnels des 4 séances (4x2h) • Valider le comportement énergétique d'un système autonome à énergie renouvelable par modélisation. • Analyser et comprendre comment favoriser au mieux les échanges d'énergie entre sa source et sa charge grâce à ses grandeurs. • Optimiser de façon simulée et réelle ces échanges en fixant le point de fonctionnement au maximum de puissance, et évaluer les écarts. • Présenter le travail pratique réalisé à tous les élèves de la classe, faire une synthèse, et structurer/restituer de façon organisée les connaissances. Séquence n°6 <table><tr><th>Types d'activité (élèves + Professeur)</th><th>Attendus à l'issue de l'activité</th><th>Supports</th><th>Nb postes</th><th>Nb élèves par poste</th><th>Durées (h)</th></tr><tr><td rowspan="3">Séance 1</td><td>Présentation générale à toute la classe des systèmes, et du travail d'évaluation des écarts à y réaliser entre sa version réelle et simulée, et formation des groupes en îlot.</td><td>4 systèmes dont on comparera l'écart entre l'optimisation réelle et simulée : 2 Modules photovoltaïques (1 îloté + 1 connecté au réseau), 1 éolienne MADA, et 1 hydrolienne avec optimisations électrique et mécanique</td><td>1</td><td>16</td><td>0,5</td></tr><tr><td>Découverte de chaque système par l'équipe qui lui a été affectée, simulation de son modèle grâce à MATLAB Simscape, et tracé de ses grandeurs physiques caractéristiques.</td><td>PC avec le logiciel MATLAB Simscape</td><td>8</td><td>2</td><td>1</td></tr><tr><td>Obtention de ses points de fonctionnement en fonction de l'état de sa charge.</td><td>IDEM</td><td>8</td><td>2</td><td>0,5</td></tr><tr><td>Séance 2</td><td>Placement de ces points sur le maximum de ces caractéristiques en complétant et implémentant un algorithme qui traque les points optimaux de puissance.</td><td>PC avec le logiciel MATLAB Simscape</td><td>8</td><td>2</td><td>2</td></tr><tr><td rowspan="2">Séance 3</td><td>Mise en service de chaque système, découverte du matériel et mesure réelle en fonction de paramètres externes des puissances de fonctionnement.</td><td>Systèmes dont le module PV isolé + Charges</td><td>4</td><td>4</td><td>1,5</td></tr><tr><td>Vérification que les points correspondant sont bien sur le maximum des caractéristiques d'un régulateur MPPT industriel, et évaluation de l'écart entre ce placement et celui simulé.</td><td>IDEM</td><td>4</td><td>4</td><td>1</td></tr><tr><td rowspan="2">Séance 4</td><td>Présentation générale de chaque équipe de leurs travaux simulé et pratique réalisés lors des études de cas, et ce à toute la classe (10 mn de présentation + 10 mn de Q/R).</td><td>PC + vidéo-projecteur</td><td>1</td><td>16</td><td>1,5</td></tr><tr><td>Synthèse à toute la classe avec structuration et restitution organisées de connaissance sur les évaluations et l'interprétation des écarts entre le réel et le simulé sur tous les systèmes.</td><td>PC + vidéo-projecteur</td><td>1</td><td>16</td><td>0,5</td></tr><tr><td>Evaluation sommative</td><td>Compte rendu du Travail Pratique de modélisation et des mesures faites. Un énoncé de TP est donné en document d'accompagnement afin de les guider dans leur démarche.</td><td>ENONCE DE TP EN DOCUMENT D'ACCOMPAGNEMENT SUIVANT UNE DEMARCHE SCIENTIFIQUE</td><td>1</td><td>16</td><td></td></tr></table>												Situation dans la progression										Durée		Approche pédagogique		1ère	Reentrée	XXXXXX	Tous les	XXXXXX	Noël	XXXXXX	Hiver	XXXXXX	Printemps	XXXXXX	Été	8	Heures	DEDUCTIVE	INDUCTIVE	X	2ème		XXXXXX	XXXXXX		XXXXXX		XXXXXX		XXXXXX		Types d'activité (élèves + Professeur)	Attendus à l'issue de l'activité	Supports	Nb postes	Nb élèves par poste	Durées (h)	Séance 1	Présentation générale à toute la classe des systèmes, et du travail d'évaluation des écarts à y réaliser entre sa version réelle et simulée, et formation des groupes en îlot.	4 systèmes dont on comparera l'écart entre l'optimisation réelle et simulée : 2 Modules photovoltaïques (1 îloté + 1 connecté au réseau), 1 éolienne MADA, et 1 hydrolienne avec optimisations électrique et mécanique	1	16	0,5	Découverte de chaque système par l'équipe qui lui a été affectée, simulation de son modèle grâce à MATLAB Simscape, et tracé de ses grandeurs physiques caractéristiques.	PC avec le logiciel MATLAB Simscape	8	2	1	Obtention de ses points de fonctionnement en fonction de l'état de sa charge.	IDEM	8	2	0,5	Séance 2	Placement de ces points sur le maximum de ces caractéristiques en complétant et implémentant un algorithme qui traque les points optimaux de puissance.	PC avec le logiciel MATLAB Simscape	8	2	2	Séance 3	Mise en service de chaque système, découverte du matériel et mesure réelle en fonction de paramètres externes des puissances de fonctionnement.	Systèmes dont le module PV isolé + Charges	4	4	1,5	Vérification que les points correspondant sont bien sur le maximum des caractéristiques d'un régulateur MPPT industriel, et évaluation de l'écart entre ce placement et celui simulé.	IDEM	4	4	1	Séance 4	Présentation générale de chaque équipe de leurs travaux simulé et pratique réalisés lors des études de cas, et ce à toute la classe (10 mn de présentation + 10 mn de Q/R).	PC + vidéo-projecteur	1	16	1,5	Synthèse à toute la classe avec structuration et restitution organisées de connaissance sur les évaluations et l'interprétation des écarts entre le réel et le simulé sur tous les systèmes.	PC + vidéo-projecteur	1	16	0,5	Evaluation sommative	Compte rendu du Travail Pratique de modélisation et des mesures faites. Un énoncé de TP est donné en document d'accompagnement afin de les guider dans leur démarche.	ENONCE DE TP EN DOCUMENT D'ACCOMPAGNEMENT SUIVANT UNE DEMARCHE SCIENTIFIQUE	1	16	
Situation dans la progression										Durée		Approche pédagogique																																																																																																	
1ère	Reentrée	XXXXXX	Tous les	XXXXXX	Noël	XXXXXX	Hiver	XXXXXX	Printemps	XXXXXX	Été	8	Heures	DEDUCTIVE	INDUCTIVE	X																																																																																													
2ème		XXXXXX		XXXXXX		XXXXXX		XXXXXX		XXXXXX																																																																																																			
Types d'activité (élèves + Professeur)	Attendus à l'issue de l'activité	Supports	Nb postes	Nb élèves par poste	Durées (h)																																																																																																								
Séance 1	Présentation générale à toute la classe des systèmes, et du travail d'évaluation des écarts à y réaliser entre sa version réelle et simulée, et formation des groupes en îlot.	4 systèmes dont on comparera l'écart entre l'optimisation réelle et simulée : 2 Modules photovoltaïques (1 îloté + 1 connecté au réseau), 1 éolienne MADA, et 1 hydrolienne avec optimisations électrique et mécanique	1	16	0,5																																																																																																								
	Découverte de chaque système par l'équipe qui lui a été affectée, simulation de son modèle grâce à MATLAB Simscape, et tracé de ses grandeurs physiques caractéristiques.	PC avec le logiciel MATLAB Simscape	8	2	1																																																																																																								
	Obtention de ses points de fonctionnement en fonction de l'état de sa charge.	IDEM	8	2	0,5																																																																																																								
Séance 2	Placement de ces points sur le maximum de ces caractéristiques en complétant et implémentant un algorithme qui traque les points optimaux de puissance.	PC avec le logiciel MATLAB Simscape	8	2	2																																																																																																								
Séance 3	Mise en service de chaque système, découverte du matériel et mesure réelle en fonction de paramètres externes des puissances de fonctionnement.	Systèmes dont le module PV isolé + Charges	4	4	1,5																																																																																																								
	Vérification que les points correspondant sont bien sur le maximum des caractéristiques d'un régulateur MPPT industriel, et évaluation de l'écart entre ce placement et celui simulé.	IDEM	4	4	1																																																																																																								
Séance 4	Présentation générale de chaque équipe de leurs travaux simulé et pratique réalisés lors des études de cas, et ce à toute la classe (10 mn de présentation + 10 mn de Q/R).	PC + vidéo-projecteur	1	16	1,5																																																																																																								
	Synthèse à toute la classe avec structuration et restitution organisées de connaissance sur les évaluations et l'interprétation des écarts entre le réel et le simulé sur tous les systèmes.	PC + vidéo-projecteur	1	16	0,5																																																																																																								
Evaluation sommative	Compte rendu du Travail Pratique de modélisation et des mesures faites. Un énoncé de TP est donné en document d'accompagnement afin de les guider dans leur démarche.	ENONCE DE TP EN DOCUMENT D'ACCOMPAGNEMENT SUIVANT UNE DEMARCHE SCIENTIFIQUE	1	16																																																																																																									

Figure 11 : Tableau présentant les contenus et attendus des différentes séances de la séquence

3.2 - Evaluations de l'acquisition des compétences et présentation détaillée d'un attendu

a) La co-évaluation formative et l'évaluation sommative

Ces deux évaluations, positionnées respectivement pendant et à la fin de la séance 4, permettent des évaluations à la fois formatives et sommatives.

En effet, la première peut se faire en collaboration (travail interdisciplinaire) avec le collègue de mathématiques afin qu'il aide à évaluer la présentation générale du travail pratique de chaque équipe, réalisée lors des simulations sur MATLAB et les mesures réelles sur les différents systèmes utilisés lors des études de cas pendant les différentes séances.

Ainsi, grâce à une fiche d'évaluation contenant des critères et des indicateurs (voir cette dernière sur l'annexe 5 [9]), le collègue évaluera plutôt leur travail sur la réalisation de l'algorithme d'optimisation associé au système étudié. Le professeur évaluera de son côté leur travail sur les différentes mesures et simulations effectuées sur ce logiciel. Enfin, cette co-évaluation sanctionnera les compétences des groupements A3, B1, B2, B3, D1, D2, D3, et E2.

La seconde évaluation sommative finale doit valider l'acquisition chez les élèves du reste des compétences visées par la séquence. Ainsi, dans l'énoncé du TP donné aux différents groupes d'élèves concernés par chaque îlot, des questions guidées leur donnent la voie de la démarche scientifique qu'ils ont à mener, afin que l'enseignant puisse évaluer l'acquisition des compétences restantes, à savoir A4 et E1. On trouvera à ce sujet dans l'annexe 6 [9] le document d'accompagnement donné au groupe du système à module PV.

b) Présentation d'une restitution à l'issu de cette exploitation pédagogique

N'ayant pas pu expérimenter cette exploitation en condition réelle en CPGE PTSI, nous l'avons néanmoins mise en œuvre avec cinq étudiants de première année de Master MEEF dans le cadre de l'Unité d'Enseignement (UE) « Energie électrique ».

Le sujet du TP, a tout d'abord abordé la simulation d'un module photovoltaïque avec une charge. Dans le cas suivant d'optimisation de production avec un contrôleur MPPT, une comparaison des résultats obtenus par simulation avec des mesures réelles a été effectuée afin d'évaluer des écarts.

Le schéma de la figure 12 présente la modélisation multiphysique avec le logiciel MATLAB d'un module photovoltaïque autonome à 80 Wc, correspondant à un des quatre systèmes de la séquence pédagogique précédente, installé tout d'abord seulement avec sa charge et deux sondes de tension et courant afin de le caractériser :

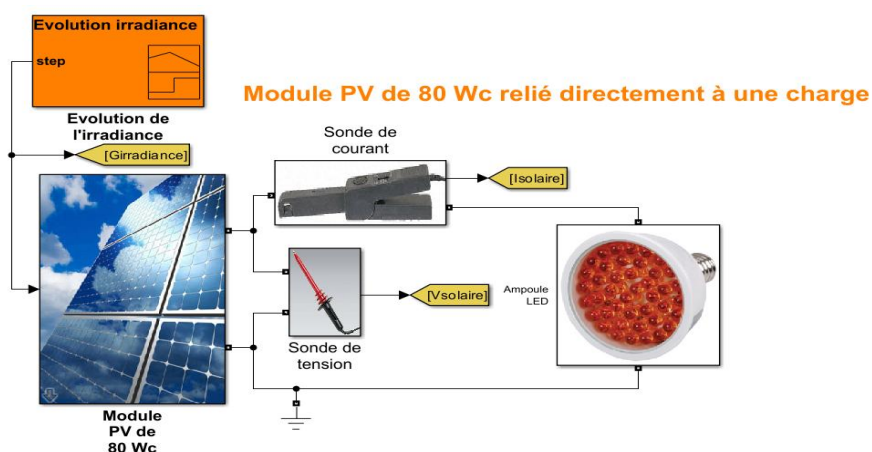
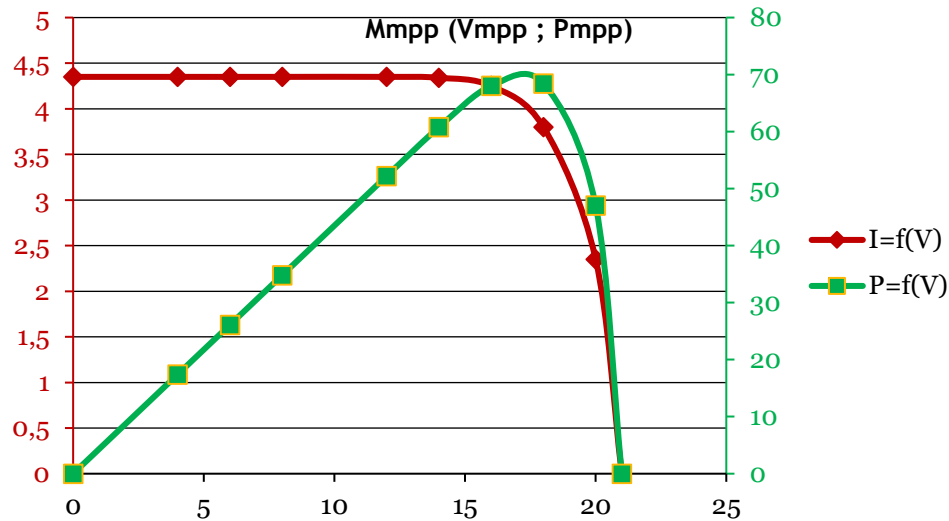


Figure 12 : Schéma de simulation de la structure de base

Dans le cadre de la simulation, il faut tout d'abord que le groupe concerné constate l'existence d'un point à puissance maximale MPP. Pour cela, les étudiants font varier la tension V aux bornes du module en changeant la valeur de la résistance de charge. La température du PV étant fixée à 25°C et l'irradiance solaire à 800 W/m^2 , pour différentes valeurs de cette résistance, la simulation a donné les courbes ci-dessous donnant les deux caractéristiques $I = f(V)$ et $P = f(V)$ du module :



On constate l'apparition d'un point à maximum de puissance : M_{MPP} (18 V ; 68,4 W).

Par ailleurs, en traçant une droite d'équation $V = 18\text{ V}$, les étudiants constatent que ce point ne correspond pas au maximum de la puissance de toutes les caractéristiques pour différentes irradiances. L'idée est alors de poursuivre la position de ce point. Pour ce faire, il faut intercaler une structure de conversion entre le module et la charge. D'où la nouvelle modélisation proposée à la figure 13 avec le module PV, sa charge et avec un modèle de régulateur MPPT (Maximal Power Point Tracking) et une batterie additionnelle :

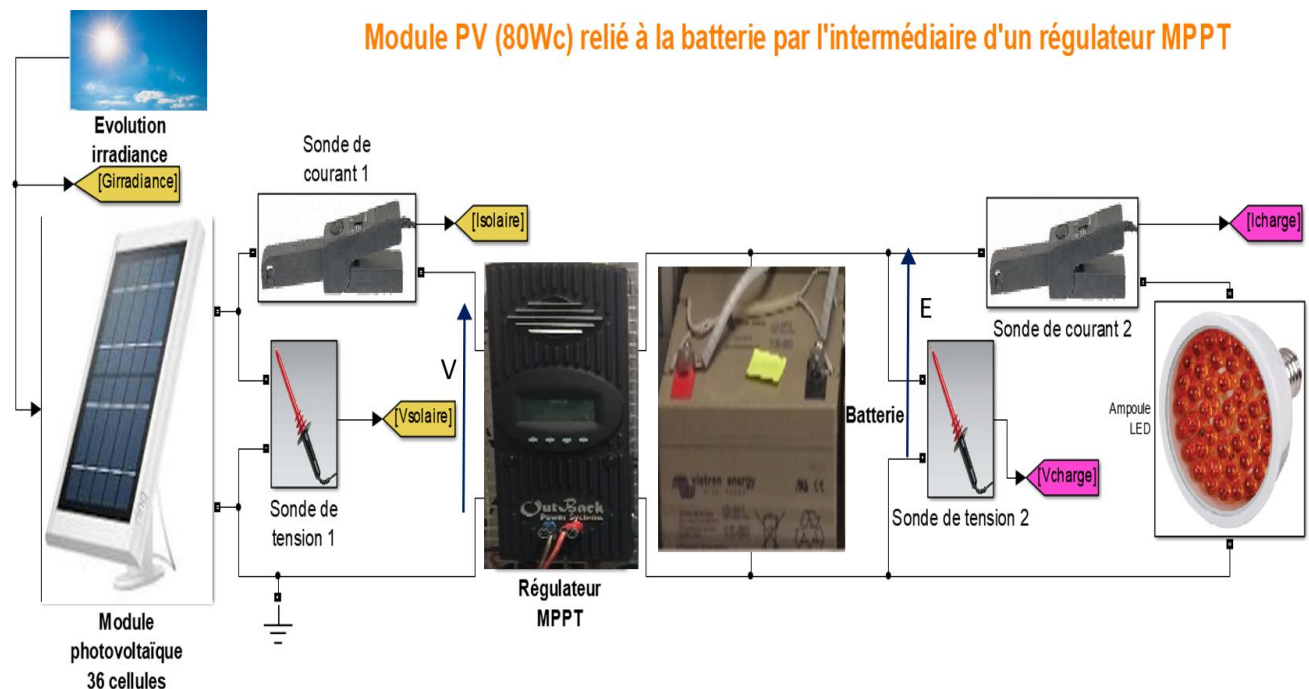


Figure 13 : Schéma de simulation avec un régulateur MPPT et une batterie

L'objectif du modèle représenté ci-dessous est d'amener à la compréhension du rôle du régulateur dans le maintien du point de fonctionnement au MPP en contrôlant la tension V (18V dans le cas d'une irradiance de 800 W/m^2). Pour ce faire, un hacheur abaisseur de tension (« BUCK » en anglais)

vient ajuster cette tension grâce au rapport cyclique d'une commande MLI (Modulation en Largeur d'Impulsions) comme le montre le schéma MATLAB de la figure 14 :

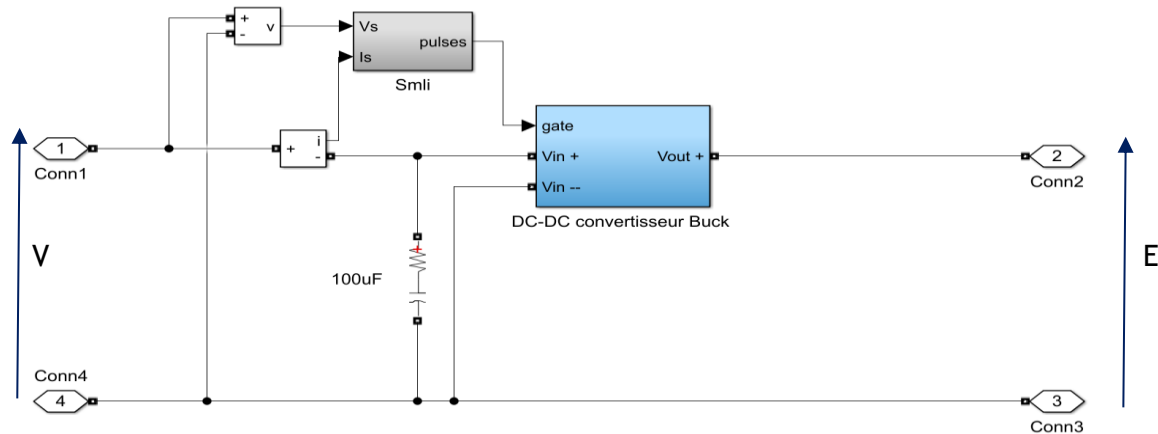


Figure 14 : Schéma de contrôle de la fonction MPPT d'un panneau photovoltaïque

La génération du rapport cyclique se fait grâce à l'algorithme d'optimisation P&O (Perturbation et Observation) dans le bloc « Programme P&O » présenté à la figure 15 :

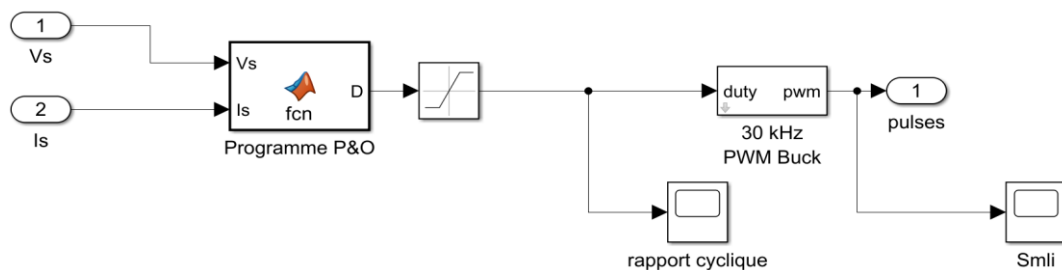


Figure 15 : Fonction de recherche du point à puissance maximale

Le programme consiste en la génération du rapport cyclique α permettant d'augmenter ou d'abaisser $V = \alpha E + (1 - \alpha)V_{OC} = 22 - 10\alpha$ (V_{OC} : Tension de circuit ouvert, « Open Circuit », ici de 22 V pour le module utilisé) afin de la positionner constamment au niveau de l'abscisse du point M_{MPP} .

Les étudiants l'ont implémenté grâce au script MATLAB de la figure 16, inclus dans le bloc « Programme P&O » donné ci-dessous :

```
function D = fcn(Vs, Is)
%#codegen
dD = 1e-5;
persistent Dav Pav Vsav
if isempty(Dav)
    Dav = 0.43;
    Vsav = 17.5;
    Pav = 0;
end
P = Is*Vs;
dV = Vs - Vsav;
dP = P - Pav;
if dP ~= 0
    if dP < 0
        if dV < 0
            D = Dav - dD;
        else
            D = Dav + dD;
        end
    else
        if dV > 0
            D = Dav - dD;
        else
            D = Dav + dD;
        end
    end
end
D = Dav;
Vsav = Vs;
Dav = D;
Pav = P;
```

Figure 16 : Listing du programme P&O

Une fois celui-ci exécuté, on obtient la stabilisation du point M_{MPP} au maximum de la caractéristique $P = f(V)$ et ce quel que soit le niveau d'irradiance G du module PV. On obtient ainsi le tableau des puissances maximales P_{MPPS} obtenues avec la simulation MATLAB présenté ci-dessous :

$G \text{ (W/m}^2\text{)}$	200	400	600	800	1000	1200
$P_{MPPS} = V_{MPPS} \cdot I_{MPPS} \text{ (W)}$	18	30	47	68	82	100

Enfin, la partie « mesure » a consisté à faire des relevés afin de tracer tout d'abord les caractéristiques réelles $I = f(V)$ et $P = f(V)$ sur le système didactique « Module PhotoVoltaïque îloté » dont une photographie avec ses éléments constitutifs est présentée à la figure 17 :

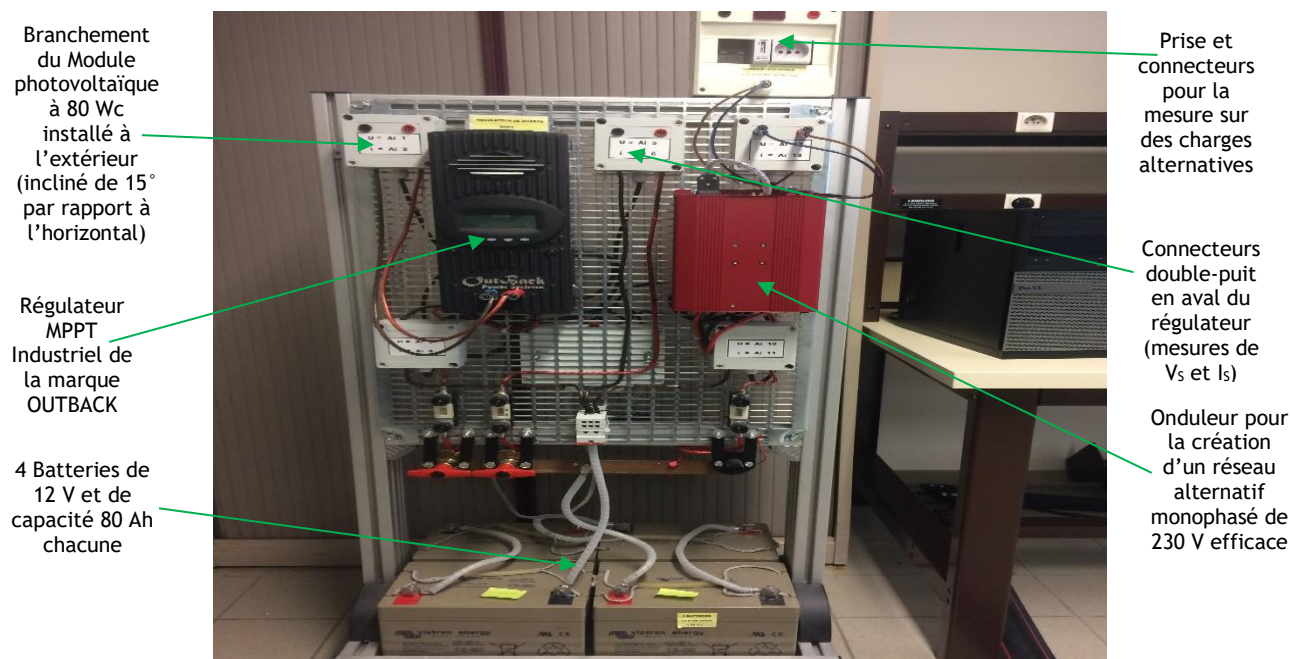


Figure 17 : Dispositif expérimental de régulation MPPT

Grâce à de nouveaux relevés, on remarque aussi la stabilisation effective des points M_{MPP} au maximum des caractéristiques : $P = f(V)$ et ce quel que soit le niveau d'irradiance G du module PV, qui a varié lors des mesures de 200 à 1000 W/m^2 .

On obtient ainsi le tableau suivant des puissances maximales P_{MPPR} obtenues cette fois-ci de façon réelle, et comparées aux P_{MPPS} du modèle MATLAB :

$G \text{ (W/m}^2\text{)}$	200	400	600	800	1000
$P_{MPPS} \text{ (W)}$	18	30	47	68	82
$P_{MPPR} \text{ (W)}$	16	31	50	65	81
Écarts relatifs (%)	5,6	3,3	6,4	1,6	1,2

Les écarts relatifs des puissances maximales entre le système simulé et réel étant inférieurs à 10%, les élèves ont pu confirmer la validité du modèle MATLAB utilisé, et être confortés dans leur démarche scientifique.

3.3 - Résultats d'évaluation des étudiants appartenant aux deux groupes d'expérimentation

Après une séquence ayant duré 8h, les résultats de l'évaluation des cinq étudiants des deux groupes sont résumés dans le tableau suivant (les autres compétences B2, D1, D2, et E2 n'ont pas été évaluées car il n'en existe pas d'équivalentes dans le Master MEEF) :

	COMPETENCES (Rouge : Non acquises, Jaune : En cours, Vert : Acquises)					
ETUDIANT 1	A3	A4	B1	B3	E1	D3
ETUDIANT 2	A3	A4	B1	B3	E1	D3
ETUDIANT 3	A3	A4	B1	B3	E1	D3
ETUDIANT 4	A3	A4	B1	B3	E1	D3
ETUDIANT 5	A3	A4	B1	B3	E1	D3

Par ailleurs, nous avons mesuré le degré d'acquisition d'une compétence si la note associée est entre :

- 0 et 25% : compétence non acquise ;
- 25% et 75% : compétence en cours d'acquisition ;
- 75% et 100% : compétence acquise.

On remarque à partir de ce tableau qu'il y a deux groupes de besoin en compétences qui ressortent :

- Groupe de besoin 1 qui doit bénéficier d'une remédiation autour de la compétence B3 : valider un modèle ;
- Groupe de besoin 2 devant bénéficier d'une remédiation autour de la compétence E1 : rechercher et traiter des informations.

Ainsi, il faut prendre en compte le besoin de ces deux nouveaux groupes d'élèves en adaptant des activités de remédiation afin qu'ils acquièrent les compétences qui leur font défaut.

4 - Conclusion

L'exploitation pédagogique de l'étude technique (voir la ressource « Étude de dimensionnement industriel d'une installation photovoltaïque de 1 MWc connectée au réseau avec stockage » [8]) s'est orientée vers trois niveaux d'étude (BAC STI2D, BUT GEII, et CPGE PTSI) avec trois démarches différentes en exploitant trois centres d'intérêts du projet technique, riche en possibilités. Ainsi, les exploitations proposées ont permis de dégager trois points d'études :

- étude transversale d'une installation PV îlotée en démarche de projet pour des terminal BAC STI2D ;
- étude de l'optimisation de cette installation dans le cas où elle serait connectée au réseau pour des BUT GEII ;
- étude de l'optimisation énergétique d'une installation PV et évaluation des écarts entre la maquette réelle et son modèle de simulation.

Références :

- [1]: Bulletin Officiel spécial n° 3 du 17 mars 2019, *Référentiel de STI2D*
- [2]: EDUSCOL, *Enseignements technologiques transversaux (série STI2D)*
- [3]: EDUSCOL, *Enseignements technologiques spécifiques (série STI2D)*
- [4]: CAPET CONCOURS EXTERNE ET CAFEP SESSION 2016, *Exploitation pédagogique d'un dossier technique*
- [5]: Programme pédagogique national 2022 du BUT, « *Génie Electrique et Informatique Industrielle* » (Ministère de l'enseignement supérieur et de la recherche)

[6]: Bulletin Officiel spécial n° 5 du 30 mai 2021, *Programmes des classes préparatoires aux grandes écoles*

[7]: <https://extra.u-picardie.fr/moodle/upjv/>

[8]: Étude de dimensionnement industriel d'une installation photovoltaïque de 1 MWc connectée au réseau avec stockage, O. Rami-Yahyaoui, 2026, https://sti.eduscol.education.fr/si-ens-paris-saclay/ressources_pedagogiques/etude-dimensionnement-industriel-installation-pv-1mwc-connectee-reseau-avec-stockage

[9]: Annexes de : Exploitation pédagogique basée sur l'étude de l'installation photovoltaïque avec stockage de 1 MWc , O. Rami-Yahyaoui, 2026, https://sti.eduscol.education.fr/si-ens-paris-saclay/ressources_pedagogiques/exploitation-pedagogique-basee-sur-letude-dinstallation-pv-avec-stockage

- Annexe 1 : Contrat individuel des tâches du projet pédagogique
- Annexe 2 : Grille individuelle AC et EE d'évaluation des 3 revues de projet
- Annexe 3 : Grille d'évaluation indicative de la soutenance du « grand oral »
- Annexe 4 : Fiche d'évaluation de la séquence en BUT GEII
- Annexe 5 : Fiche d'évaluation de la séquence en CPGE PTSI
- Annexe 6 : Document d'accompagnement du travail pratique en CPGE PTSI
- Annexe 7 : Fichiers de simulations matlab simscape