

Robotique agricole et génie électrique : enjeux pour l'agriculture de demain

Caroline ACANFORA - Mathieu LANOIR
Benoît POUBLAN - Kevin YVEN

Édité le
09/04/2026

école _____
normale _____
supérieure _____
paris-saclay _____

Caroline Acanfora est Responsable Pôle de Compétence Systèmes Embarqués et Algorithmes Robotiques, Mathieu Lanoir est Ingénieur R&D en Navigation et Systèmes Embarqués, Benoît Pouban est Responsable Produit et Agriculteur, et Kevin Yven est Ingénieur Sécurité Embarquée chez Agreenculture.

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

Le secteur agricole mondial est confronté à des enjeux complexes : répondre aux impératifs de souveraineté alimentaire tout en faisant face à une pénurie structurelle de main-d'œuvre qui fragilise les exploitations. Pour maintenir une production agricole compétitive, l'automatisation des tâches agricoles par des outils robotisés se présente comme un levier stratégique clé. Elle offre la promesse de libérer l'agriculteur des tâches les plus pénibles, répétitives ou chronophages, lui permettant de se recentrer sur la gestion agronomique et la valeur ajoutée de son exploitation.

Cette transition vers une agriculture de précision ne vise pas seulement l'efficacité quantitative : elle cherche à rationaliser chaque intervention et à optimiser l'usage des intrants, pour construire un modèle de production plus durable.

En agriculture, les systèmes robotisés évoluent dans des environnements ouverts et très variables (sols, cultures, météo, luminosité, ...) qui imposent des contraintes techniques importantes. Les fonctions de détection et de localisation sont au cœur de ces systèmes : elles garantissent la sécurité des personnes et des biens, permettent la précision des interventions et fournissent des données exploitables pour l'analyse et la planification.

L'objectif de cet article est d'aborder en particulier trois sujets : les enjeux de la localisation dans un contexte robotique, ceux de la détection dans un milieu agricole et nous ferons ensuite un focus sur les bus de communication terrain, largement utilisés dans l'agricole.

Cet article a été construit de manière collaborative, avec la participation de plusieurs experts au sein de l'entreprise Agreenculture. Fondée en 2016 et basée à Toulouse, la startup fournit aux constructeurs de machines et de tracteurs des solutions permettant de rendre autonomes des machines travaillant en milieu extérieur et hors-route. Grâce à l'AGCbox, les machines et tracteurs deviennent intelligents, communicants et capables de se déplacer avec précision et sécurité, en conformité avec la réglementation européenne, pour travailler dans une zone délimitée sans nécessiter la présence d'un opérateur sur site.

1 - Localisation en environnement agricole

L'agriculture de précision et la robotisation des exploitations agricoles imposent des exigences croissantes en matière de localisation des engins. Contrairement aux environnements industriels, le milieu agricole présente des caractéristiques hostiles pour les systèmes de positionnement :

vastes étendues non structurées, végétation dense, conditions météorologiques variables et absence d'infrastructure fixe. De plus, les contraintes agronomiques et de rendement pour optimiser le taux de remplissage de la parcelle, par exemple, nécessite que le parcours des machines soit extrêmement précis. Dans ce contexte, la question du positionnement - c'est à dire répondre à la question "Où se trouve la machine ?" - se révèle être un verrou technologique central pour l'autonomie des machines agricoles. Cet article propose un tour d'horizon des besoins, des défis et des solutions liés au positionnement en robotique agricole.

1.1 - À quoi sert le positionnement en robotique agricole ?

A. Guidage et contrôle de la machine

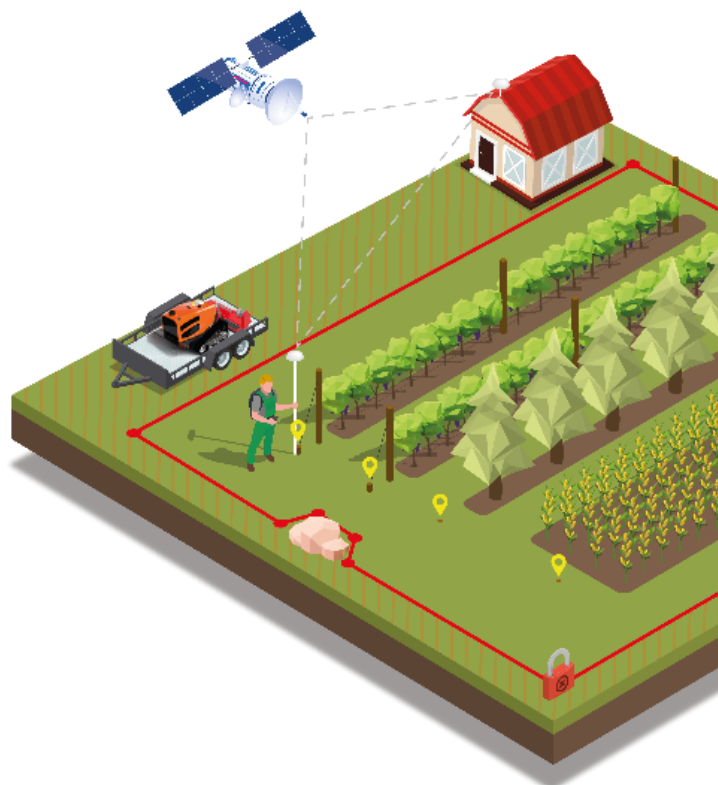


Figure 1 : Arpentage par Agreenculture

Dans le domaine agricole on utilise majoritairement de la géolocalisation ce qui veut dire que l'on connaît les positions GNSS de la machine et la position GNSS des cultures ou obstacles. Il faut passer par une phase de numérisation de la parcelle, que l'on nomme arpentage, qui nous donnera les coordonnées des éléments clés que la machine devra reconnaître.

La première fonction du positionnement est le guidage de la machine dans la parcelle. Selon le type d'engin (tracteur, chenillard, enjambeur) et le type de culture (rangées de cultures pérennes, grandes cultures, cultures maraîchères en buttes), les contraintes de trajectoire varient sensiblement. En grande culture, le guidage par GNSS-RTK (Real-Time Kinematic) permet d'assurer un suivi de ligne avec une précision centimétrique, réduisant les chevauchements et optimisant la consommation d'intrants. En arboriculture ou viticulture, la navigation inter-rangées peut nécessiter en complément du GNSS-RTK, une perception locale (LiDAR, vision) pour s'adapter à la géométrie variable des rangées.

Au-delà du guidage, la connaissance de la position permet de piloter précisément les outils : déclenchement des semoirs section par section, modulation de dose d'épandage selon les zones, activation des buses de pulvérisation. Ces fonctions, regroupées sous le terme d'agriculture de précision, reposent entièrement sur la qualité du positionnement instantané de la machine.

B. Suivi agronomique et cartographie

Le positionnement est également la clé de voûte du suivi agronomique. En associant une coordonnée géographique à chaque observation terrain - indice de végétation, détection de maladie, rendement mesuré depuis la machine - il est possible de construire des cartes de parcelles qui serviront à moduler les interventions futures. Ces cartes constituent la mémoire numérique de l'exploitation.

Des solutions commerciales comme les plateformes de télédétection par drone reposent sur cette logique : la valeur agronomique de la donnée est nulle sans une géolocalisation fiable. Les variations temporelles importantes entre stades culturaux (sol nu, levée, couverture complète) rendent l'interprétation d'autant plus délicate si le géoréférencement est imprécis.

C. Sécurité et traçabilité

Une troisième dimension, concerne la sécurité opérationnelle. Pour qu'une machine autonome puisse opérer sans nécessiter la présence humaine permanente, il est nécessaire de garantir qu'elle ne sortira pas de sa zone de travail, et n'écrasera personne. Pour le premier point il est primordial de définir des périmètres de sécurité (les barrières peuvent être physiques ou virtuelles) pour garantir que la machine reste en permanence dans les zones autorisées et n'aille pas sur une route. Cette zone virtuelle est appelée géofencing, zone d'opération géoréférencée. Cela implique non seulement de connaître la position, mais aussi d'en certifier la validité à tout instant. La définition de cette zone lors de l'arpentage doit être au moins aussi précise, fiable et intègre que le positionnement en temps réel.



Figure 2 : Géofencing certifié - Safencing® par Agreenculture



Figure 3 : Schéma explication différence entre précision et intégrité - Agreenculture

C'est ici qu'intervient la notion d'intégrité : il ne suffit pas de fournir une position, il faut garantir, avec un niveau de confiance quantifié, que la position délivrée est juste à une incertitude connue près. Cette exigence, héritée de l'aviation (concept de RAIM - Receiver Autonomous Integrity Monitoring), commence à s'imposer dans le domaine agricole, notamment pour les applications à risque élevé (épandage de produits phytosanitaires près de zones protégées ou dangereuses).

1.2 - Les difficultés spécifiques du milieu agricole

A. Des exigences élevées en précision, disponibilité et intégrité

La performance d'un système de positionnement agricole s'évalue selon trois critères fondamentaux :

- **La précision** : selon l'application, les exigences vont du décimètre (suivi de rang) au centimètre (semis de précision, contrôle d'outil). Une erreur de positionnement peut se traduire par une perte de rendement ou une détérioration de la culture.
- **La disponibilité** : la machine ne doit pas être contrainte d'interrompre son travail faute de signal de positionnement. Le débit de chantier est un critère économique majeur pour l'agriculteur.
- **L'intégrité** : la capacité du système à détecter et signaler une défaillance dans les délais impartis est essentielle pour la sécurité (aspects légaux) mais aussi pour protéger l'intégrité physique de la culture et de son environnement.

La combinaison de ces trois exigences est particulièrement contraignante et constitue l'un des principaux défis de l'ingénierie du positionnement agricole.

B. Un environnement peu structuré et perturbateur

Le milieu agricole est complexe pour les systèmes de navigation. En grandes cultures, l'absence de références visuelles stables rend difficile toute localisation basée uniquement sur la perception : le sol nu au printemps, les rangs de blé en été et la terre travaillée en automne constituent des environnements visuellement très différents pour un même capteur.

En arboriculture ou dans les exploitations avec des haies et des bosquets, les obstacles végétaux constituent des sources de masquage et de multi-trajets pour les signaux GNSS. Les arbres en bord de parcelle, les structures métalliques (serres, silos) peuvent dégrader significativement la qualité du signal reçu. Ces dégradations peuvent se traduire par des sauts de position ou une perte temporaire du positionnement RTK, avec des conséquences directes sur le guidage.

Par ailleurs, les conditions d'humidité, de poussière et de vibrations mécaniques intenses (liées aux outils) sont des facteurs de vieillissement accéléré pour les capteurs embarqués, et doivent être prises en compte dès la conception du système.

Ces critères sont d'autant plus importants que la qualité perçue du système de localisation conditionne directement l'acceptabilité de la solution par les utilisateurs.

1.3 - Les solutions technologiques mises en œuvre

A. Les technologies de positionnement disponibles

1. GNSS-RTK

Le GNSS-RTK (Real-Time Kinematic) est aujourd'hui la technologie de référence pour le positionnement centimétrique en agriculture. Son principe repose sur la correction différentielle en temps réel : une station de base fixe, dont la position est connue avec précision, transmet des corrections à la machine mobile, qui les applique sur sa mesure de phase de porteuse pour atteindre une précision de l'ordre du centimètre dans un rayon de 10 à 15 km. Des réseaux de stations virtuelles (type NTRIP) permettent d'étendre cette couverture à l'échelle nationale.

Ses principales limites sont sa sensibilité aux perturbations du signal (masquage, multi-trajets) et sa faible fréquence de mise à jour (typiquement 10 Hz), insuffisante pour le contrôle en temps réel de systèmes dynamiques rapides.

2. Centrale inertielle (IMU / AHRS)

Les centrales inertielles (*Inertial Measurement Unit* ou *IMU*) combinent accéléromètres et gyroscopes pour estimer la vitesse angulaire et l'accélération de la machine. Elles fonctionnent à haute fréquence (typiquement 100 à 500 Hz) et ne dépendent d'aucune infrastructure externe. Associées à un filtre d'attitude (AHRS), elles permettent d'estimer les angles d'Euler (roulis, tangage, cap) de la machine, ce qui est particulièrement utile sur terrain vallonné pour corriger les effets de la pente et de dévers sur le guidage et le positionnement.

Leur principale limitation est la dérive temporelle inhérente à l'intégration numérique des mesures inertielles : sans recalage régulier par une source de mesures de position (GNSS), l'erreur de position croît rapidement. Leur utilisation en autonomie est donc limitée à des durées courtes, en complément d'autres capteurs. Rappelons que les IMU/AHRS ne mesurent pas de position mais "seulement" des déplacements. Même une centrale de grade militaire a besoin par principe d'un calage initial.

Contrairement à d'autres applications, l'utilisation d'un magnétomètre dans l'agricole est peu fréquente car l'environnement d'une machine agricole peut localement perturber le champ magnétique de celui-ci.

3. Odométrie

L'odométrie exploite les codeurs de roues ou de chenilles pour estimer le déplacement de la machine à partir de son modèle cinématique. Sa fréquence de mise à jour est intermédiaire (5 à 20 Hz). Son principal défaut en contexte agricole est la sensibilité au glissement des roues sur terrain meuble ou humide, phénomène fréquent qui peut introduire des erreurs significatives dans l'estimation de la trajectoire.

4. Perception extéroceptive (Caméra, LiDAR)

Les capteurs de perception, caméras monoculaires ou stéréo, LiDARs 2D ou 3D, permettent d'exploiter des amers naturels (rangs de culture, bords de parcelle, structures végétales) pour localiser la machine par rapport à son environnement immédiat. Ils sont particulièrement utiles pour le suivi de rang en viticulture ou arboriculture, où la structure répétitive de la végétation constitue un repère naturel fiable.

Leurs limites sont leur sensibilité aux conditions d'éclairage (caméras) et aux obstructions (poussière, feuilles), ainsi qu'une fréquence de traitement parfois faible selon la charge de calcul embarqué. Ils constituent néanmoins un complément précieux pour pallier les déficiences du GNSS en zones masquées.

B. La fusion de capteurs : vers une localisation robuste

Aucune des technologies présentées ci-dessus n'est suffisante isolément pour répondre aux exigences de précision, disponibilité et intégrité en toutes conditions. La solution opérationnelle réside dans la fusion de capteurs, qui consiste à combiner de manière optimale les informations issues de sources complémentaires.

1. Fusion pour le guidage haute fréquence

La combinaison IMU / Odométrie / GNSS RTK (éventuellement complétée par LiDAR) constitue l'architecture la plus répandue. Elle repose généralement sur un filtre de Kalman étendu (EKF) ou un filtre particulière, qui maintient une estimation probabiliste de l'état de la machine (position, vitesse, orientation). Le GNSS fournit la référence absolue à faible fréquence, tandis que l'IMU et l'odométrie assurent la propagation de l'état entre deux mesures GNSS, garantissant ainsi une **haute fréquence de commande** pour le guidage (> 50 Hz) et une continuité de service lors des coupures GNSS.

2. Intégrité et monitoring pour la sécurité

Le GNSS S-RTK reste la technologie la mieux maîtrisée pour la certification de la précision, il offre des indicateurs de qualité normalisés (HDOP, nombre de satellites...). Pour les applications de sécurité, plusieurs mécanismes complémentaires sont mis en œuvre inspirés de concepts utilisés en navigation aéronautique :

- Redondance : utilisation de deux antennes GNSS espacées sur la machine, permettant de vérifier la cohérence de la position et d'estimer le cap sans mouvement.
- Le monitoring continu de l'intégrité des données dès la phase d'arpentage de la parcelle, avec analyse des points de contrôle.
- La vérification de cohérence en temps réel entre les différentes sources (GNSS, IMU, odométrie) pour détecter toute anomalie avant qu'elle n'affecte le guidage.

Tableau 1 - Comparaison des technologies de positionnement agricole

Technologie	Précision	Fréquence	Disponibilité
GNSS- Safe RTK	-1 cm	-10 Hz	Moyenne (masquage)
IMU / AHRS	~ 100 mètres/min	> 100 Hz	Excellente
Odométrie	-5 cm (glissement)	-10 Hz	Excellente
LiDAR / Caméra	Contextuelle	5-30 Hz	Variable
Fusion IMU+GNSS+ODO	-2 cm (fusionné)	> 50 Hz ;	Très bonne

En conclusion, le positionnement en robotique agricole est un domaine à la croisée de la géodésie, de la navigation inertielle, de la perception robotique et de la théorie de l'estimation. L'architecture de fusion GNSS-RTK / IMU / odométrie, complétée par des capteurs de perception pour les environnements dégradés, s'impose aujourd'hui comme la solution de référence pour les systèmes autonomes embarqués sur engins agricoles.

Les défis actuels portent notamment sur l'extension de l'intégrité au niveau système (au-delà du seul GNSS), l'adaptation des algorithmes de fusion à la diversité des modèles cinématiques des machines agricoles, et la robustesse aux conditions extrêmes du terrain.

2 - Détection et sécurité

Nous avons vu dans le chapitre précédent que l'une des conditions à remplir pour pouvoir laisser une machine autonome agricole est qu'elle n'entraîne pas de collision. Une fonction nécessaire à la robotique agricole est donc la détection. Dès lors qu'un engin opère sans conducteur, la capacité à détecter un obstacle inattendu et à y réagir de manière appropriée devient une exigence de sécurité fondamentale, à la fois pour protéger les personnes présentes dans l'environnement de la machine, préserver les cultures et les biens, et satisfaire aux obligations réglementaires croissantes du secteur.

La détection d'obstacles en milieu agricole est cependant un problème bien plus difficile qu'il n'y paraît. Contrairement à un entrepôt logistique ou une route balisée, un champ est par nature un environnement non structuré, dynamique et fortement variable selon les saisons, les cultures et les conditions météorologiques. Les solutions développées pour d'autres secteurs comme l'automobile, l'industrie, la robotique indoor, ne se transposent pas directement. Elles doivent être repensées, combinées et validées dans des conditions d'utilisation qui n'ont pas d'équivalent ailleurs.

De plus en robotique agricole, le porteur (tracteur, robot) n'est pas le seul élément que nous devons sécuriser. Les outils (hermes, semoir, outils de travail du sol, pulvérisateurs, etc.) ne doivent pas entrer en collision ou comporter de risques pour leurs environnements.

2.1 - Que cherche-t-on à détecter, et pourquoi est-ce difficile ?

A. Une grande diversité d'obstacles

La première difficulté tient à l'hétérogénéité des obstacles susceptibles d'être rencontrés dans un contexte agricole. On peut les regrouper en quatre catégories principales :

- **Personnes** : promeneurs, riverains, travailleurs intervenant dans la parcelle, enfants. C'est la catégorie la plus critique sur le plan de la sécurité, et celle qui exige le niveau de fiabilité de détection le plus élevé. La complexité vient du fait qu'un humain peut être partiellement dissimulé dans les rangs d'une culture haute (maïs, tournesol) ou encore en mouvement rapide.
- **Animaux** : chevreuils, sangliers, lièvres, mais aussi animaux d'élevage en cas de clôture défaillante. Leur comportement imprévisible ou leur camouflage dans l'environnement en font des cibles particulièrement délicates pour les capteurs.
- **Objets et débris** : pierres émergentes, voitures garées, outils oubliés, palettes, souches, câbles d'irrigation. Ces obstacles statiques sont souvent de petite taille ou partiellement enfouis, ce qui limite leur détectabilité par les capteurs à distance.
- **Végétation** : branches basses, haies en limite de parcelle, cultures elles-mêmes. Cette catégorie est la source principale de faux positifs, car la végétation est omniprésente, en mouvement constant sous l'effet du vent, et évolue morphologiquement tout au long de la saison.

B. Le défi de la disponibilité opérationnelle

Au-delà de la diversité des cibles, la contrainte opérationnelle la plus structurante est celle de la disponibilité : un système de détection qui arrête la machine à chaque rafale de vent dans les feuilles, à chaque motte projetée par l'outil, ou à chaque oiseau traversant le champ est inutilisable en conditions réelles. L'agriculteur, dont l'activité est soumise à des fenêtres météorologiques

étroites et à des impératifs de débit de chantier, n'aura pas l'utilité d'un système qui dégrade la productivité de manière significative.

On touche ici à un arbitrage fondamental en ingénierie de la sécurité : la tension entre **sensibilité** (ne rien laisser passer) et **spécificité** (ne pas générer de fausses alarmes). En agriculture, la densité d'éléments végétaux, de variations de sol et de conditions changeantes est telle que même un taux de faux positifs faible en apparence peut conduire à plusieurs dizaines d'arrêts intempestifs par heure de travail.

La réponse à cette contrainte passe par des architectures de détection intelligentes, capables de contextualiser les alarmes et de distinguer un obstacle réel d'un artefact environnemental.

C. Stratégies de sécurisation

Face à cette double contrainte de fiabilité maximale sur les cibles critiques et tolérance aux éléments non dangereux, deux grands principes architecturaux structurent les systèmes de détection agricoles :

- **Redondance des capteurs** : plusieurs capteurs de technologies différentes couvrent simultanément la même zone de surveillance. Une alarme n'est déclenchée que si plusieurs capteurs convergent vers la même conclusion. Cette approche réduit drastiquement les faux positifs sans sacrifier la sensibilité sur les vraies détections.
- **Réactions automatiques graduées** : plutôt qu'un simple arrêt d'urgence, les systèmes modernes implémentent une chaîne de réactions proportionnelles au niveau de certitude. Une détection incertaine déclenche un ralentissement préventif ; une détection confirmée d'un obstacle critique provoque l'arrêt complet. Cette graduation préserve la disponibilité opérationnelle tout en garantissant la sécurité.

2.2 - Les technologies de capteurs pour la détection d'obstacles

Plusieurs technologies de capteurs ressortent dans le cadre de la détection pour la sécurité. Nous allons en détailler les principales.

A. LiDAR

Principes et atouts

Le LiDAR (Light Detection And Ranging) émet des impulsions laser et mesure le temps de retour pour reconstituer un nuage de points 3D de l'environnement. C'est aujourd'hui la technologie de référence pour la détection d'obstacles en robotique mobile extérieure, et son adoption dans le machinisme agricole s'accélère.

Ses principaux atouts dans un contexte agricole sont :

- Nuage de points haute résolution : la densité du nuage permet de restituer fidèlement la géométrie des obstacles, même de faible dimension (un être humain assis au sol, une pierre de 20 cm).
- Champ de vision très large : les LiDARs rotatifs couvrent jusqu'à 360° en azimut, offrant une surveillance périmétrique complète autour de la machine sans zone aveugle latérale.
- Robustesse aux conditions climatiques : contrairement aux caméras, le LiDAR n'est pas sensible aux variations d'éclairage (travail de nuit possible) et résiste bien à la pluie légère et à la poussière.

- Détection polyvalente : quelle que soit la nature de l'obstacle (humain, animal, objet métallique ou organique) le LiDAR détecte tout ce qui réfléchit le signal laser à la distance et à l'angle d'incidence appropriés. Seules les surfaces fortement spéculaires (vitres, miroirs, surfaces chromées) posent des difficultés de réflexion, cas peu fréquents en milieu agricole.

Limites

Il existe cependant des limites à son usage, tel que l'occlusion, qui correspond à un obstacle masqué par un autre, par exemple, un enfant derrière un rang de maïs dense. Il est invisible pour le LiDAR, qui ne voit que la première surface réfléchissante. Cette limite est inhérente à la physique du capteur.

Aussi, la classification des objets détectés est difficile. En effet, le nuage de points LiDAR permet de détecter et localiser un obstacle, mais l'identifier comme un être humain, un animal ou un objet inerte est une tâche complexe. Les algorithmes de segmentation et de classification sur nuage de points existent, mais leur robustesse en environnement agricole reste un sujet de recherche actif.

B. Radar

Principes et atouts

Le radar émet des ondes électromagnétiques (typiquement dans la bande 24 GHz ou 77 GHz pour les applications embarquées) et analyse les échos reçus pour détecter des cibles en mouvement ou statiques. Sa physique propre lui confère des propriétés complémentaires au LiDAR.

Sa robustesse climatique extrême est un véritable atout, les ondes radar traversent la pluie, le brouillard et la poussière sans atténuation significative, y compris dans des conditions où le LiDAR ou les caméras seraient fortement dégradés.

Chaque écho radar est caractérisé par une **Surface Équivalente Radar** (SER ou RCS : Radar Cross Section), qui dépend à la fois de la taille et du type de matériau réfléchissant. Cette information constitue une signature physique partielle de l'obstacle, exploitable pour discriminer certaines catégories de cibles. Une feuille isolée, une branche fine ou un épi de céréale présente une RCS très faible et génère peu ou pas d'écho radar, ce qui réduit naturellement le taux de faux positifs liés à la végétation légère, contrairement au LiDAR qui détectera toute surface réfléchissante.

Limites

- Sa résolution spatiale est inférieure au LiDAR : la longueur d'onde plus grande du radar se traduit par une résolution angulaire moins fine, rendant difficile la localisation précise d'un obstacle de petite taille.
- Classification limitée : comme le LiDAR, le radar seul ne permet pas d'identifier la nature d'un obstacle avec une fiabilité suffisante pour des applications de sécurité.

C. Détection par intelligence artificielle et vision

Un changement de paradigme

L'introduction de l'intelligence artificielle et plus précisément des réseaux de neurones convolutifs (CNN) appliqués à l'analyse d'images, représente un changement de paradigme dans l'approche de la détection d'obstacles. Les systèmes classiques (LiDAR, radar) filtrent des obstacles selon des critères géométriques ou physiques : taille, distance, réflectivité. L'IA, elle, filtre par catégorie sémantique.

Les avantages spécifiques à l'application agricole sont significatifs, en effet il est possible de faire de la :

- **Détection par catégorie** : le système ne cherche plus un "objet de taille supérieure à X cm" mais un "être humain", un "animal", un "véhicule". Cette approche est bien plus robuste face à la diversité des objets présents en champ.
- **Détection partielle et postures atypiques** : un réseau de neurones entraîné sur des données suffisamment variées peut détecter un être humain partiellement dissimulé dans les rangs d'une culture, couché au sol, ou dans une posture inhabituelle, cas qui mettent en échec les détecteurs géométriques classiques.

Enfin les coûts *hardware* sont accessibles, une caméra RGB (Red Green Blue) industrielle est significativement moins coûteuse qu'un LiDAR de haute précision. La valeur ajoutée réside dans l'algorithme d'inférence et le calculateur embarqué, dont les performances progressent rapidement (GPU embarqués, accélérateurs neuromorphiques).

Limites

- Absence d'information de distance : une caméra monoculaire ne fournit aucune information de profondeur. Savoir qu'un humain est détecté dans l'image ne suffit pas, il faut également connaître sa distance pour adapter la réaction de la machine. Cette limite impose soit une fusion avec un capteur de distance (LiDAR, radar), soit le recours à une caméra stéréo ou Time-of-Flight.
- Sensibilité aux conditions d'éclairage et de saleté : contrairement au LiDAR ou au radar, une caméra est fortement affectée par une forte lumière rasante, une ombre dense, de la poussière sur l'optique ou une lentille souillée par la boue.
- Dépendance aux données d'entraînement : la performance d'un modèle IA est intrinsèquement liée à la représentativité de son jeu de données d'entraînement. Un modèle peu exposé à des cas agricoles spécifiques (rangs denses, terrains boueux, lumière rasante) présentera des lacunes de détection dans ces conditions.

D. La fusion de capteurs : vers une détection robuste

Aucune technologie prise isolément ne répond à l'ensemble des exigences de la détection agricole. La voie incontournable est celle de la fusion de capteurs, qui consiste à combiner les informations complémentaires issues de modalités différentes pour produire une décision plus fiable qu'aucun capteur seul ne pourrait fournir.

L'exemple le plus abouti aujourd'hui est la fusion **caméra 3D + IA**. Une caméra stéréo ou Time-of-Flight (ToF) fournit une carte de profondeur dense de la scène, tandis qu'un réseau de neurones analyse simultanément l'image RGB (couleur) pour identifier les catégories d'obstacles. La combinaison permet d'obtenir à la fois la localisation précise de l'obstacle dans l'espace 3D et son identification sémantique. Des architectures similaires associent LiDAR et caméra (LiDAR pour la géométrie, IA pour la classification), ou radar et vision (radar pour la robustesse climatique, IA pour la discrimination des catégories).

Ces architectures multimodales sont aujourd'hui au cœur des travaux de R&D dans le domaine de la sécurité des machines agricoles autonomes, et constituent la base des solutions commerciales émergentes les plus avancées. Elles s'accompagnent de couches logicielles de fusion, filtres de Kalman, réseaux bayésiens, algorithmes d'association de pistes, dont la conception est elle-même un sujet de recherche à part entière.

Tableau 2 - Comparaison des technologies de détection d'obstacles en contexte agricole

Critère	LiDAR	Radar	Caméra + IA	Ultrasons	Fusion multi-capteurs
Précision spatiale	Très haute	Moyenne	Haute (2D)	Faible	Très haute
Robustesse météo	Bonne	Excellente	Faible	Bonne	Excellente
Classification sémantique	Difficile	Difficile	Excellente	Absente	Excellente
Info de distance	Oui	Oui	Non (mono)	Oui (proche)	Oui
Faux positifs végétation	Élevés	Moyen	Faible	Élevés	Faibles
Coût relatif	Élevé	Moyen	Faible-Moyen	Faible	Variable

2.3 - Les défis d'intégration et d'homologation

A. Les contraintes d'intégration physique sur la machine

Au-delà des contraintes algorithmiques, l'intégration physique des capteurs sur les engins agricoles soulève des défis d'ingénierie spécifiques, souvent négligés dans les approches purement académiques.

La première contrainte concerne la modularité, combinée aux contraintes de fiabilité, de robustesse et de coût. Pour cela, la solution doit être :

- Adaptable pour des outils variés avec des dimensions variables ;
- Fiable : Avoir un niveau de performance garanti suffisant pour fonctionner en autonomie ;
- Robuste aux conditions des champs ;
- Coût : concevoir un système de détection suffisamment flexible sans embarquer d'intelligence ou de capteurs coûteux dans chaque outil.

La deuxième contrainte tient à l'impossibilité de **modifier profondément la structure du véhicule porteur**. Contrairement à un véhicule autonome conçu *from scratch*, un tracteur agricole est une machine existante dont l'architecture mécanique est figée. Il n'est pas possible d'y intégrer un pare-chocs instrumenté comme sur une voiture, ni de percer le châssis pour y loger des capteurs. Les solutions de détection doivent donc être conçues comme des systèmes add-on, montés sur des supports standardisés (barre de toit, arceau de protection, montants de cabine) sans modification irréversible du véhicule.

Cette contrainte d'intégration non invasive a des conséquences directes sur la couverture de détection : les zones mortes, notamment dans le plan horizontal proche de la machine et dans l'axe de l'outil porté, sont difficiles à éliminer sans un positionnement soigné des capteurs et une fusion intelligente des champs de vue.

B. L'acceptabilité et l'homologation

Pour que ces systèmes atteignent le terrain, deux conditions sont nécessaires au-delà de la performance technique : l'acceptabilité par les agriculteurs et la conformité réglementaire.

L'acceptabilité passe avant tout par la robustesse opérationnelle. Un système qui fonctionne bien en démonstration mais génère des arrêts intempestifs dans les conditions réelles de l'exploitation sera rapidement désactivé par l'utilisateur – annulant tout bénéfice de sécurité. Les constructeurs et développeurs doivent donc investir massivement dans la validation en conditions réelles, sur une diversité de cultures, de saisons et de régions. La co-construction avec des agriculteurs pilotes est une pratique indispensable pour identifier les cas limites non anticipés.

Sur le plan réglementaire, plusieurs normes encadrent la sécurité des machines agricoles. La directive européenne Machines (**2006/42/CE**, en cours de révision) impose une analyse des risques et la mise en place de mesures de réduction proportionnelles. Des normes spécifiques aux tracteurs et machines automotrices (**ISO 18497** – Agricultural machinery and tractors – Safety of highly automated agricultural machines) définissent des exigences fonctionnelles pour les systèmes de détection embarqués. Ces cadres normatifs influencent directement les choix architecturaux des systèmes de détection, notamment en termes de redondance, de modes de défaillance sûrs et de traçabilité des décisions.

La détection d'obstacles et la sécurisation des machines agricoles autonomes constituent un domaine à la croisée de la robotique, du traitement du signal, de l'intelligence artificielle et de l'ingénierie mécanique. La diversité des obstacles à détecter, la variabilité de l'environnement agricole et les contraintes d'intégration physique sur des machines existantes rendent ce problème considérablement plus difficile que ses équivalents dans d'autres secteurs.

3 - Architecture électronique et communication

L'essor de l'agriculture de précision, l'automatisation et l'autonomie ont entraîné une montée en puissance rapide de l'électronique dans les machines agricoles. Ces technologies apportent de nouvelles fonctionnalités, un meilleur confort d'utilisation et une meilleure efficacité. Elles suscitent toutefois des inquiétudes légitimes chez les exploitants : plus un système contient de composants électroniques, plus il semble exposé aux risques de panne.

Dans un contexte où les fenêtres d'intervention se resserrent et où la disponibilité des machines est cruciale, l'immobilisation d'un outil ou d'un tracteur représente un coût bien supérieur à la seule facture de réparation. La fiabilité devient donc un critère fondamental dans la décision d'investissement. Les constructeurs doivent répondre à ces attentes avec des architectures électroniques robustes, standardisées et faciles à diagnostiquer.

C'est précisément ce besoin qui a favorisé l'adoption massive du bus CAN (Controller Area Network) dans le secteur agricole. Conçu par Bosch dans les années 80 pour simplifier les architectures électriques dans l'automobile, il s'est aujourd'hui également imposé dans le secteur agricole. Tous les tracteurs, outils et équipements modernes s'appuient dessus pour fonctionner ensemble de manière standardisée. Il apporte une solution pour se débarrasser des connexions points à points au profit d'un réseau partagé, réduisant considérablement la quantité de câblage et, par conséquent, des sources potentielles de défaillance.

Par sa conception, le CAN offre une communication fiable même dans un environnement électrique perturbé. Sa structure différenciée torsadée limite les interférences, tandis que ses mécanismes intégrés – détection d'erreurs, retransmission automatique, arbitrage non destructif – garantissent l'intégrité de l'information, même en présence de bruit électromagnétique ou de collisions de messages.

Le bus CAN s'appuie aujourd'hui sur plusieurs standards complémentaires :

- **ISO 11898** : définit la couche physique et la couche liaison du CAN ;
- **SAE J1939** : très utilisé sur les motorisations pour structurer les messages applicatifs (vitesse, charge moteur, diagnostic...) ;
- **ISOBUS (ISO 11783)** : standard spécifique au secteur agricole, basé sur CAN mais étendant ses couches applicatives pour permettre la communication unifiée entre tracteurs, outils, consoles et systèmes de gestion de l'exploitation.

Ces standards renforcent l'interopérabilité et simplifient le développement, tout en offrant à l'utilisateur final une expérience plus fluide.

L'objectif principal de l'ISOBUS est simple : connecter n'importe quel outil à n'importe quel tracteur via une interface commune, en particulier le terminal en cabine (UT - Universal Terminal). Cela évite de multiplier les consoles propriétaires ou les faisceaux complexes, tout en facilitant l'installation, l'utilisation et la maintenance des équipements.

- Pour les constructeurs, l'ISOBUS fournit un cadre technique clair permettant de développer des solutions dans un environnement standardisé, sans réinventer la pyramide protocolaire pour chaque machine ou outil.
- Pour les distributeurs et le SAV, il constitue un socle idéal pour déployer des solutions de télémétrie, d'autodiagnostic et de maintenance prédictive. Les messages CAN et J1939 sont déjà largement structurés pour transporter des informations d'état, de température, de pression, de défauts ou de performances. Cela facilite grandement la détection des pannes et réduit les immobilisations des machines.

Le bus de terrain CAN est devenu un incontournable du monde agricole et par extension de la robotique agricole que ce soit sur les machines, les capteurs ou les actionneurs on le retrouve partout et il répond parfaitement aux besoins de l'agricole.

4 - Conclusion

La robotique agricole est, par nature, une discipline de synthèse. Comme l'illustrent les trois parties de cet article, aucun des verrous technologiques rencontrés – qu'il s'agisse de localiser une machine avec précision, de détecter un obstacle au milieu d'un champ ou de faire communiquer des équipements de marques différentes – ne se résout par une technologie isolée. C'est toujours la combinaison qui prime : fusion de capteurs pour le positionnement, redondance multimodale pour la sécurité ou protocoles normalisés pour l'interopérabilité.

Le fil conducteur commun à ces trois thématiques est la contrainte du terrain. La motte de terre qui génère un faux positif, l'arbre en bordure qui masque le signal GNSS, la pluie qui brouille une caméra au moment critique du chantier : c'est cette friction permanente entre la performance théorique des systèmes et la réalité du champ qui définit les vrais défis de l'ingénierie embarquée agricole. Elle impose des choix robustes, validés en conditions réelles, et acceptés par des utilisateurs dont la tolérance à la défaillance est, à juste titre, très faible.

L'électronique, quant à elle, fait partie intégrante de la robotique. Que ce soit dans le domaine du signal, du capteur, des calculateurs ou encore de la communication, toutes les disciplines sont représentées et challengées dans le cas de la robotique agricole. Pour les ingénieurs et chercheurs qui s'y aventurent, ce domaine offre un terrain d'innovation rare : des problèmes ouverts, des environnements non maîtrisés, et l'obligation de confronter ses modèles à la réalité. Le champ, au sens propre comme au sens figuré, est ouvert.

5 - Références

- Règlement (UE) 2023/1230 dit “Règlement Machines”
- Directive 2006/42/CE du Parlement Européen Relative aux Machines.
- ISO 13482:2014 - Robots and Robotic Devices
- ISO 18497:2018 - Agricultural machinery and tractors - Safety of highly automated agricultural machines
- ISO 11898-1:2024 - Road vehicles – Controller area network (CAN)
- SAE J1939® Enhanced DBC - Streaming Processes for Heavy-duty Vehicles
- ISO 11783-1:2017 - Tracteurs et matériels agricoles et forestiers – Réseaux de commande et de communication de données en série
- GNSS RTK - principes et applications
- Robagri - Tracteur autonome : réglementation, sécurité et avenir de l’agriculture de précision

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

Étude de dimensionnement industriel d'une installation photovoltaïque de 1 MWC connectée au réseau avec stockage

Omar RAMI-YAHYAOUÏ¹

La Revue 3EI
Culture Sciences
de l'Ingénieur

Édité le
16/03/2026

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.

À l'ère de la transition et de la sobriété énergétiques, de plus en plus d'industriels ou d'agriculteurs veulent réduire leur facture d'électricité en trouvant une autre solution intelligente d'alimentation de leurs différentes charges électriques en complément du réseau électrique de distribution. Dans ce cadre, l'installation photovoltaïque (PV) apporte une bonne alternative, de plus en plus économique, pérenne, et assez simple à mettre en œuvre car exploitant la toiture des bâtiments de production et de stockage de ces utilisateurs, qui sont généralement de surface suffisante pour avoir un productible solaire suffisamment important pour que la solution soit économiquement viable. Si l'on ajoute à cela la possibilité de stockage de l'énergie solaire, elle le devient encore plus, car les utilisateurs peuvent décaler leur consommation d'électricité par rapport à la production PV qui ne se font pas nécessairement au même moment.

L'étude technique qui va suivre prendra appui sur un projet mise en œuvre dans le cadre d'une installation PV de type industriel. Ce projet consiste en la conception et le dimensionnement d'une installation photovoltaïque non îlotée (connectée au réseau de distribution public d'électricité) avec stockage d'énergie, pour un fabricant de structures dans le domaine de la construction de bâtiments métalliques. L'entreprise installatrice qui s'est occupée de l'étude est un ensemblier qui réalise la conception de l'installation PV, fournit ses éléments constitutifs, la fabrique et assure la maintenance associée. Cet installateur est un spécialiste dans la couverture photovoltaïque des hangars de type agricole. **L'article illustre sa méthodologie de dimensionnement qui intègre des pratiques dictées par des raisons économiques et de fiabilité de fonctionnement : elle peut être différente d'une approche de dimensionnement académique ainsi que le lecteur pourra l'observer.**

Le bâtiment de ce client, demandant une installation photovoltaïque avec stockage au vu de sa consommation énergétique importante, a une surface de toiture suffisante pour être autosuffisant, comme nous allons le voir, entre mai et septembre de chaque année. Ceci lui permettra de faire des économies d'énergie et donc pécuniaires importantes pour avoir un assez rapide retour sur investissement estimé à environ 4 ans et 3 mois.

Ce projet répond donc à deux impératifs importants du développement durable :

- **Economique** : Il contribue grandement à l'autonomie énergétique de l'industriel en le rendant de plus en plus indépendant vis-à-vis du réseau électrique, d'où une future réduction de ses factures d'électricité.
- **Environnemental** : Il permet la réduction des émissions CO₂ et autres gaz à effet de serre, liée à une consommation énergétique propre issue d'une solution qui va devenir essentiellement à énergie renouvelable et de moins en moins fossile provenant du réseau.

Dans cet article sera présenté d’abord la filière « Vente totale et d’autoconsommation d’électricité d’origine photovoltaïque en France ». Ensuite, viendra la naissance du projet technique avec une mise en lumière de sa problématique. Dans la seconde partie, une solution d’installation photovoltaïque complète (connectée au réseau électrique avec stockage) pour un client et répondant aux exigences de son cahier technique des charges sera détaillée.

1 - Présentation du contexte et mise en lumière de la problématique

1.1 - La filière vente totale d’électricité à origine photovoltaïque

1.1.1 - Présentation de la filière « vente en France »

À l’origine, le marché photovoltaïque français était principalement constitué de sites isolés, avec des installations îlotées de petites tailles qui n’étaient pas raccordées au réseau électrique public. C’est à partir de la fin du 20^{ème} siècle qu’une filière dite de vente totale voit le jour. En effet, cela débute après la signature des accords de Kyoto en 1997, où des solutions pour limiter les émissions de gaz à effet de serre sont proposées dans de nombreux pays développés. Il était ainsi évoqué des alternatives aux énergies fossiles polluantes : l’énergie solaire était considérée comme une solution durable fournissant de l’électricité « propre » sur le long terme.

Ainsi dès le début du 21^{ème} siècle, un tarif de rachat de l’électricité produite par les installations photovoltaïques a été fixé par le gouvernement français afin de pouvoir espérer un retour sur investissement rapide, et donc inciter la population, composée en majeure partie de particuliers et non encore d’industriels, à s’équiper. Cependant, ce tarif n’était pas très intéressant face à un investissement matériel parfois important. Cela a contraint le gouvernement à augmenter les prix d’achat et instaurer une prime à l’intégration-bâti en 2006. Mais c’est surtout en 2009 que la filière connaît son développement le plus significatif. En effet, le prix des modules photovoltaïques chute face à une demande toujours plus forte, et si l’on prend en compte les nouveaux tarifs d’achats, on comprend aisément que les projets PV soient devenus très rentables et qu’il ne pouvait en résulter qu’une augmentation du nombre de demandes de raccordement au réseau. Entre 2008 et 2010, la puissance installée a été ainsi multipliée par 10 ! Les courbes suivantes présentent ces évolutions :

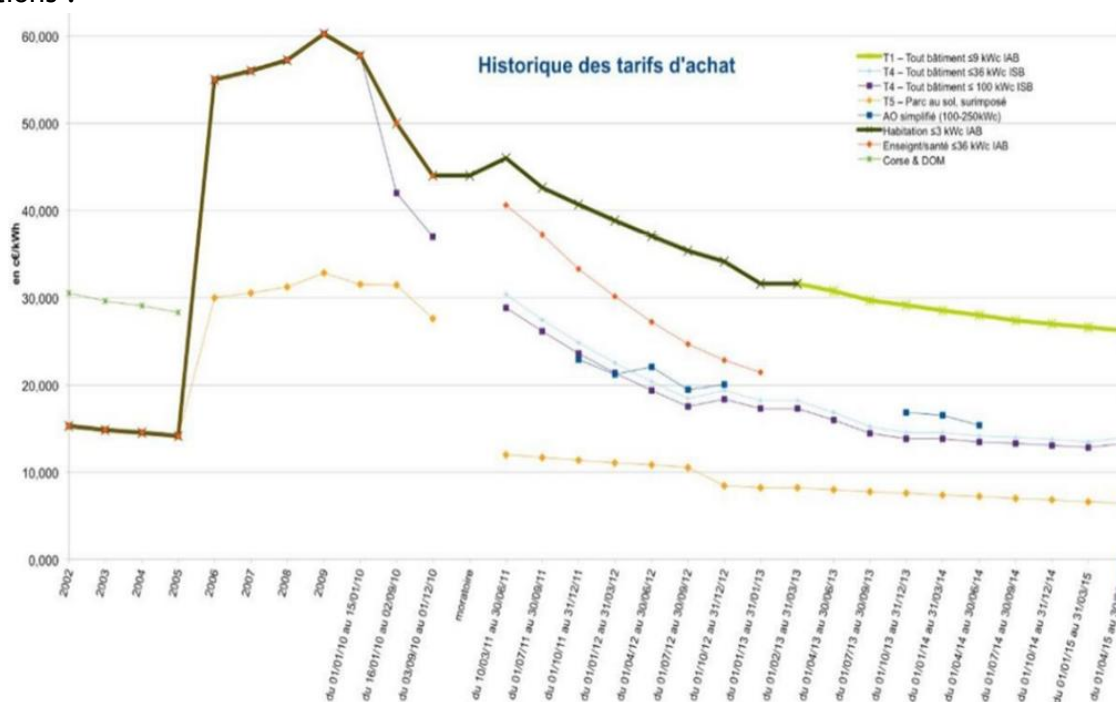


Figure 1 : Courbes représentant les évolutions des tarifs d’achat de la filière vente de la production photovoltaïque en fonction de son installation, source « photovoltaïque.info »

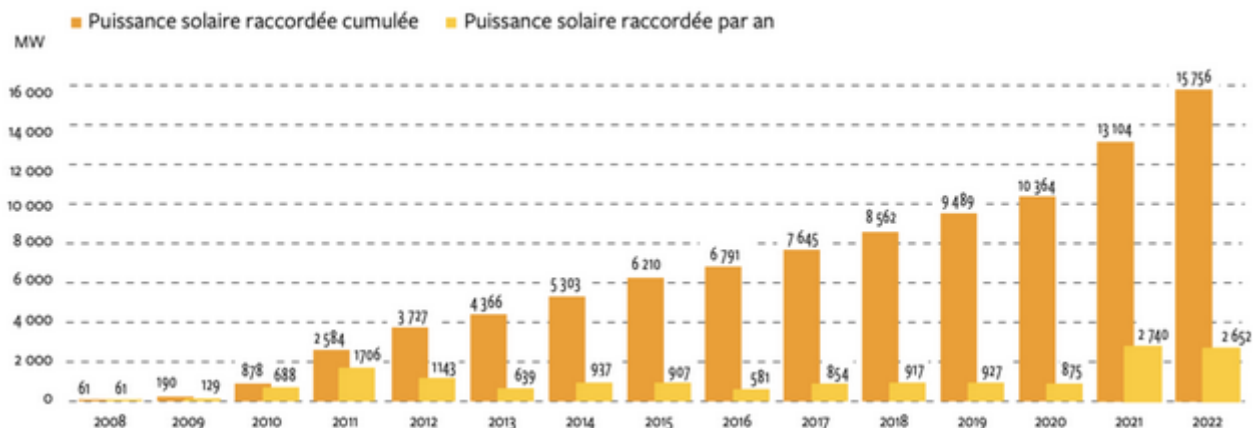


Figure 2 : Évolution de la puissance solaire raccordée sur le réseau de distribution électrique français, source RTE (gestionnaire du Réseau de Transport d'Électricité)

Cependant, les objectifs fixés par le Grenelle de l'environnement pour 2012 ayant été dépassés en 2009, un moratoire a été décrété en décembre 2010 suspendant ainsi l'obligation d'achat d'EDF (Électricité De France), pour une période de trois mois, d'électricité provenant de tout projet d'une puissance supérieure à 3 kWc. Il s'agissait de la première réelle barrière au photovoltaïque que la France ait connue à ce jour, avec comme conséquence la liquidation judiciaire de nombreuses entreprises du secteur. La filière reprendra son développement à partir de l'année 2015, avec la continuité de la baisse du prix des panneaux photovoltaïques. Le dernier arrêté tarifaire en vigueur a été instauré en mai 2017 avec l'intégration d'un tarif pour l'autoconsommation avec vente du surplus d'électricité produite si non consommée par le foyer en question. Ceci a conduit ces dernières années au développement de la filière d'autoconsommation, car il était désormais plus intéressant de réduire ses factures d'électricité que de la vendre. En 2018, la prime d'intégration au bâti disparaît en raison d'un nombre d'incidents techniques trop importants, tels que des problèmes d'étanchéité ou des incendies. Le coût lié à la réparation des dégâts surpassant largement le montant de cette prime. De ce fait, la surimposition en toiture est devenue la principale technique d'intégration de panneaux photovoltaïques.

1.1.2 - Recours à des appels d'offres pour certains projets d'installation

La législation actuelle impose de recourir à des appels d'offres pour tout projet de puissance supérieure à 500 kWc installé en une fois. Les entreprises candidatant à un de ces appels d'offres doivent remplir un dossier reposant sur un cahier des charges précis où l'on retrouve notamment le bilan carbone des modules photovoltaïques en termes de fabrication, de transport jusqu'au lieu d'implantation, et de nombreux autres détails sur le projet envisagé. Elles se doivent également de fixer un prix de rachat de l'électricité. Ainsi, le lauréat, désigné par la CRE (Commission de Régulation de l'Énergie), est la société dont le projet est jugé le plus rentable, avec la meilleure contribution au développement durable. Ainsi deux solutions coexistent si un client souhaite installer une puissance supérieure à 500 kWc :

- l'installation de l'intégralité de la puissance souhaitée sur toiture, mais non branchement de la partie au-delà de 500 kWc qui sera mise en service après 18 mois selon un calendrier d'ENEDIS (Gestionnaire du réseau français de distribution d'électricité) ;
- l'installation initiale d'une centrale de 500 kWc, puis l'installation de l'extension après 18 mois.

C'est la première option qui va être choisie pour l'industriel dont l'installation PV va être étudiée dans la seconde partie de cet article.

Enfin, pour ce type de client, trois types d'installations PV sont actuellement proposés :

- la vente totale qui est l'installation majoritaire. Dans cette situation, les chantiers sont limités à 250 kVA d'onduleur pour environ 300 kWc, ce qui permet de rester en raccordement BT (segment C4, ancien tarif jaune). Cela a plusieurs avantages : bénéficier d'une réfaction de 40 % sur le coût du raccordement pris en charge par le gestionnaire d'électricité. De plus, cela dispense l'installateur du champ PV de réaliser les ouvrages HTA.
- l'autoconsommation, une part de l'énergie consommée est issue exclusivement de la production photovoltaïque, avec vente du surplus. L'installation est dimensionnée pour réduire, voire annuler, la consommation énergétique du client, et bénéficie en plus d'un tarif d'achat pour la revente du surplus. L'utilisation des batteries de stockage est nécessaire afin d'éviter au client de payer trop de taxes liées à la revente, comme le TURPE (Tarif d'Utilisation du Réseau Public d'Electricité) ou l'IFER (Imposition Forfaitaire sur les Entreprises de Réseaux)
- l'autoconsommation totale. L'installation est uniquement destinée à couvrir la consommation énergétique du client, car elle ne permet pas de revendre le surplus, d'où l'utilisation aussi de batteries. Enfin, les centrales fournissant ce type de consommation sont raccordées sur le tableau général basse tension (TGBT) de l'installation existante, ce qui impose une contrainte de puissance. Dans cette situation, la puissance de l'onduleur photovoltaïque doit être inférieure ou égale à la puissance de soutirage existante, et être limitée à 500 kWc.

Ainsi, dans le cadre de cette étude, c'est la seconde solution qui sera mise en place pour un champ photovoltaïque d'environ 1 MWc. En effet, dans une installation en autoconsommation avec vente de surplus de production, il va y avoir nécessairement une recherche de stockage d'une partie, ce qui permet au client concerné de ne pas payer trop de taxes TURPE et IFER, d'alléger certaines démarches administratives, et tendre à devenir électriquement autonome. Cette autonomie peut être atteinte occasionnellement grâce au décalage temporel permis par des batteries entre la production solaire et sa consommation.

1.2 - Généralités sur les centrales photovoltaïques

1.2.1 - Les différents éléments d'une installation photovoltaïque

a) Modules photovoltaïques et notion de puissance-crête (Wc)

Un module photovoltaïque comporte un ensemble de cellules assemblées en série et/ou en parallèle en fonction des caractéristiques électriques que l'on souhaite obtenir. Elles sont composées de matériaux semi-conducteurs (principalement du silicium mono ou polycristallin) dont la protection est assurée par plusieurs couches. La première, en contact direct avec les cellules, est constituée d'EVA (Ethylène-Acétate de Vinyle) qui permet d'assurer une bonne étanchéité à l'eau et à l'air et de résister aux radiations solaires (UV-B). Une plaque de verre et un cadre recouvrent cette couche EVA et garantissent la robustesse du module face aux intempéries.

Par ailleurs, la puissance d'un module photovoltaïque s'exprime en Watt-crête (Wc). Il s'agit de la puissance maximale pouvant être produite par le module dans des Conditions de Test Standard en laboratoire (STC en anglais), soit sous une température de 25°C, un angle d'incidence du rayonnement solaire de 48°, et une irradiance de 1000 W/m². On comprend donc que la puissance d'un module photovoltaïque est une valeur idéale, rarement atteinte dans des conditions réelles d'utilisation, d'où la recherche d'optimisation de l'énergie qu'il produit. Le rôle de ce module, dont la composition est décrite figure 3, est donc de convertir l'énergie solaire en énergie électrique.



Figure 3 : Composition d'un module photovoltaïque

b) Les onduleurs : convertisseurs DC/AC

Les onduleurs convertissent les grandeurs continues (DC) produites par des panneaux photovoltaïques (ensemble de modules) en grandeurs alternatives (AC), qui sont injectées dans le réseau public, en cas de surproduction, grâce à un transformateur élévateur ou abaisseur de tension, dépendamment de la tension fournie par ces panneaux. Un dispositif de découplage intégré (formé d'un synchronisateur, analyseur et compteur) fait l'interface entre le réseau Basse Tension (BT) en aval de l'onduleur et l'amont du transformateur. En cas de coupure du réseau de distribution, il empêche l'onduleur d'y réinjecter de l'énergie. Les onduleurs doivent donc en être équipés afin que leurs constructeurs puissent fournir le certificat de conformité associé (DIN VDE 0126), document exigé par les bureaux de contrôles normatifs. Les onduleurs les plus utilisés par le fabricant ensemble sont le CORE 1 (50 kVA), le STP 25000TL (25kVA), et plus récemment le CORE 2 (110 kVA) de la marque allemande SMA, ainsi que le SE100K (100 kVA) et SE33K (33 kVA) de la marque israélienne SOLAR EDGE (la documentation technique des onduleurs SMA utilisés lors du projet technique est donnée en annexe 2 [1]).

c) Les coffrets électriques de protection

Ces coffrets sont composés d'abord d'un boîtier DC en amont de l'onduleur qui permet de protéger le champ solaire grâce à des sectionneurs et parafoudres. Cependant, ils sont de moins en moins utilisés car ces éléments de protection sont maintenant directement intégrés aux onduleurs. Ensuite, il y a le coffret AC protégeant la partie alternative en aval des onduleurs grâce à des disjoncteurs, et aussi sectionneurs puis parafoudres. Les coffrets qu'utilise le plus le fabricant ensemble sont dimensionnés par son bureau d'étude, puis réalisés par les tableautiers EUTELEC [<https://www.eutelec.fr/>] (voir figure 4) ou KAMASE [<https://kamase.com/>].



Figure 4 : Exemple de boîtier électrique de protection 100 kW (doc. EUTELEC)

d) L'Appareil Général de Coupure et de Protection (AGCP)

L'AGCP permet de mettre hors tension l'ensemble de l'installation photovoltaïque, et d'assurer le comptage de l'électricité, puis aussi la séparation entre le coté distribution (ENEDIS) régi par la norme NFC 14-100 et le coté consommation (client) régi par la NFC 15-100. Il a également le rôle de protection entre le coffret AC et le point de livraison ENEDIS, et se compose également d'un disjoncteur différentiel généralement de type SCHNEIDER NSX.

e) Les batteries de stockage électrique industriel

Installer un système de stockage présente plusieurs avantages pour un producteur d'énergie solaire, dont l'optimisation de sa consommation électrique. En effet, il y a des périodes de la journée où la production solaire est plus importante que la consommation. Pour une installation en autoconsommation totale, ce surplus d'énergie non consommé est perdu, d'où son stockage dans des batteries qui vont former une sorte de « tampon d'énergie » entre une période de forte production et une autre de forte consommation (typiquement entre le milieu de la journée et sa fin). Ainsi, à l'aide du stockage, l'énergie en surplus est emmagasinée, ce qui permet de l'utiliser plus tard quand la production photovoltaïque ne sera plus suffisante pour répondre aux besoins électriques (ciel nuageux, nuit, etc.). **Ce premier fonctionnement est appelé « l'optimisation de l'autoconsommation ».**

Selon la configuration de l'installation, l'énergie stockée dans les batteries peut fonctionner de concert avec la production solaire afin de réduire l'énergie soutirée au réseau. Par exemple, l'énergie stockée dans les batteries pourra venir compléter l'énergie solaire produite pour réduire, voire annuler, l'énergie soutirée, et ainsi limiter au maximum les dépassements de puissance et donc les pénalités associées. **Ce second fonctionnement est nommé « l'écrêtage ».**

Ce stockage peut aussi être priorisé en fonction des périodes de la journée ou de l'année. En effet, le prix de l'énergie évoluant en fonction des périodes d'utilisation selon le type de contrat souscrit, le surplus solaire peut être stocké pendant les périodes où l'électricité est bon marché, et être sollicité les périodes où le tarif est plus élevé. Cela permet au client de décaler le soutirage au réseau électrique pendant les périodes creuses. Cependant la réglementation interdit de charger le stockage avec le réseau de distribution, sa charge devant être uniquement assurée grâce à la production solaire. **Ce dernier fonctionnement est appelé « période d'utilisation ».**

Par ailleurs, le système de stockage par batteries est la technologie qui a le plus évolué techniquement ces dernières années. En effet, leurs capacités ont très fortement augmenté au cours de la dernière décennie, notamment grâce à un important investissement effectué par les grands groupes automobiles. Cette évolution technique rapide a permis une forte réduction des coûts, qui rend cette technologie beaucoup plus accessible aujourd'hui, notamment à l'échelle du stockage industriel concerné par ce projet.

Il existe quatre types de batteries pouvant être dédiées au stockage de l'énergie solaire :

- **Batterie plomb-acide AGM (Absorbed Glass Mat) :** dotée d'un séparateur, en fibres de verre entre ses plaques, saturé d'acide/électrolyte. Il est ensuite emballé et comprimé entre ces plaques, ce qui induit une réaction ultrarapide entre ces dernières et l'acide.
- **Batterie au plomb ouverte :** ses électrodes sont à base de plomb, et son électrolyte est un mélange d'eau et d'acide sulfurique. Ce sont des plaques constituées d'un alliage de plomb dit « durci ». Cette technologie est surtout utilisée dans l'industrie et dans l'équipement des véhicules ferroviaires et automobiles.

- **Batterie GEL** : son électrolyte est figé par l'addition de gel de silice, et de l'acide phosphorique est additionné afin d'améliorer la durée de vie en cyclage profond. Des fissures se créent aussi lors des premiers cycles au travers de l'électrolyte gélifié entre les électrodes positives et négatives afin de faciliter la recombinaison en favorisant le transport de gaz. Elles ont l'énorme avantage d'être étanches, et ne nécessitent presque pas d'entretien, avec une sécurité renforcée par rapport aux batteries plomb ouvertes, ce qui les favorise pour plus d'application, notamment pour le stockage de l'énergie PV.
- **Batterie au Lithium** : cette dernière est le modèle le plus performant en matière d'évolution technologique (voir le schéma de la figure 5). Le Lithium est également utilisé dans les batteries de smartphone, d'ordinateur ou encore de voitures électriques. Le rendement charge-décharge de la batterie solaire au lithium est supérieur à 90% ce qui lui confère un atout non négligeable. Elle ne nécessite pas d'entretien et est plus compacte et légère que ses concurrentes (d'où une densité énergétique supérieure). Elle peut supporter jusqu'à 6 000 cycles de charge-décharge, ce qui lui assure une longévité d'une vingtaine d'années à raison d'un cycle par jour pour une application photovoltaïque. Ces batteries se déclinent en de nombreux types avec des caractéristiques propres à chaque utilisation. **Ainsi le modèle le plus en adéquation avec le stockage solaire est la batterie au Lithium Fer Phosphate (LFP) car elle supporte des micro-cyclages, c'est-à-dire des petites charges et décharges très répétitives (ce qui détériore une batterie normale).**

Ce type est composé de matériaux présents en assez grande quantité sur la planète : Le fer et le phosphate. Elle est donc moins polluante qu'une autre technologie basée sur des matériaux rares et sujets à controverses, comme le Cobalt par exemple. Cependant elle est également composée de Lithium, qui est un composé chimique prélevé bien souvent en Amérique du Sud et dont l'extraction est responsable de la pollution du sol et de l'air.

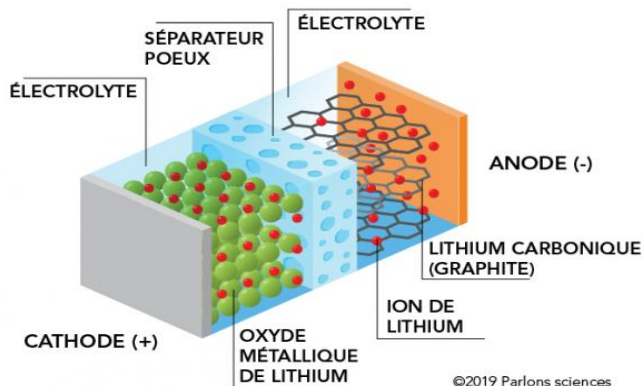


Figure 5 : Composition interne d'une batterie de type LFP

1.2.2 - Systèmes d'intégration et de fixation des modules photovoltaïques sur toiture

Le système d'intégration permet de fixer les modules sur une toiture. Les deux principaux types de systèmes d'intégration pour toitures inclinées sont :

- Les intégrés aux bâtis, qui font office de toiture en remplaçant la couverture existante. En revanche, ces derniers présentent des inconvénients majeurs dans certains cas, comme des fuites d'eau lors de fortes précipitations car remplaçant un toit, d'où parfois des problèmes d'étanchéité.
- Les systèmes surimposés (présenté à la figure 6), où les modules photovoltaïques sont fixés sur des rails, eux-mêmes fixés sur la toiture (couverture majoritairement en bac acier). Les panneaux sont ainsi espacés de quelques centimètres par rapport à la toiture ce qui permet

une aération par dessous et donc un meilleur rendement. C'est ce style de fixation des modules qui sera adopté dans le cadre du projet industriel présenté lors de la partie 2.

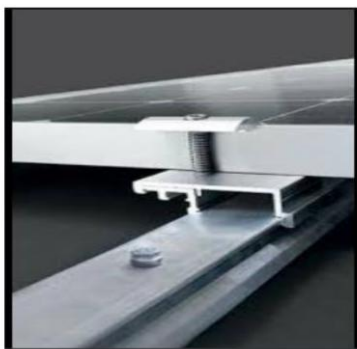


Figure 6 : Système d'intégration d'un module en surimposé

1.3 - Emergence du projet et naissance de sa problématique

1.3.1 - Contexte général du projet technique

Vu les contextes écologique, énergétique et géopolitique actuels, l'approche que les industriels français ont vis-à-vis de l'utilisation de l'énergie électrique d'origine PV a grandement évolué. Ainsi les installateurs sont de plus en plus sollicités par des clients du secteur de l'industrie pour élaborer des solutions techniques visant une utilisation efficace de cette énergie, et ce afin de diminuer de façon significative leurs factures d'électricité.

Dans ce cadre, une PME française située au sud de la Haute-Marne, non loin de Dijon, et constructeur de bâtiments métalliques, a fait une demande à un installateur pour la réalisation d'une étude en autoconsommation avec vente de surplus. L'étude qui suit va montrer que son profil annuel de consommation électrique l'orientera vers une solution d'installation photovoltaïque avec stockage par batteries. Cette solution étant conséquente au niveau de la puissance crête installée, génère un surplus d'énergie pendant les phases de sous-consommation qui sera stocké afin de l'utiliser plutôt pendant les phases de surconsommation.

1.3.2 - La problématique

La problématique générale de cet article peut être exprimée autour du questionnement suivant :

« Comment répondre au profil de consommation de ce client en faisant en sorte qu'il soutire ou réinjecte le minimum d'énergie au réseau, et ce afin de diminuer de façon conséquente sa facture d'électricité ? »

Ainsi cet article se chargera d'étudier la meilleure solution technique répondant à cette problématique, qui sera basée sur une installation photovoltaïque d'environ 1 MWc avec stockage industriel et connexion au réseau public de distribution électrique grâce à des onduleurs.

2 - Présentation d'une solution répondant au cahier technique des charges

2.1 - Etude et dimensionnement de l'installation photovoltaïque complète du client industriel

2.1.1 - Profil de consommation électrique du client

Dans un premier temps, et afin de dimensionner au mieux la solution complète que souhaite proposer l'installateur PV à son client, il est nécessaire de connaître ses consommations détaillées. Cela commence par la consultation de ses factures énergétiques afin d'établir une moyenne mensuelle de son profil annuel de consommation électrique. En effet, comme le client à un compteur géré par le gestionnaire de réseaux ENEDIS, il est possible avec son consentement d'utiliser la plateforme SGE (Système de Gestion des Echanges dont le lien d'accès est : <https://www.enedis.fr/acceder-aux-donnees-fournies-par-enedis>) proposée par ce gestionnaire. Cet outil permet de faire une demande sur une année de la courbe de charge enregistrée par son compteur, tel que le montre la figure 7 :

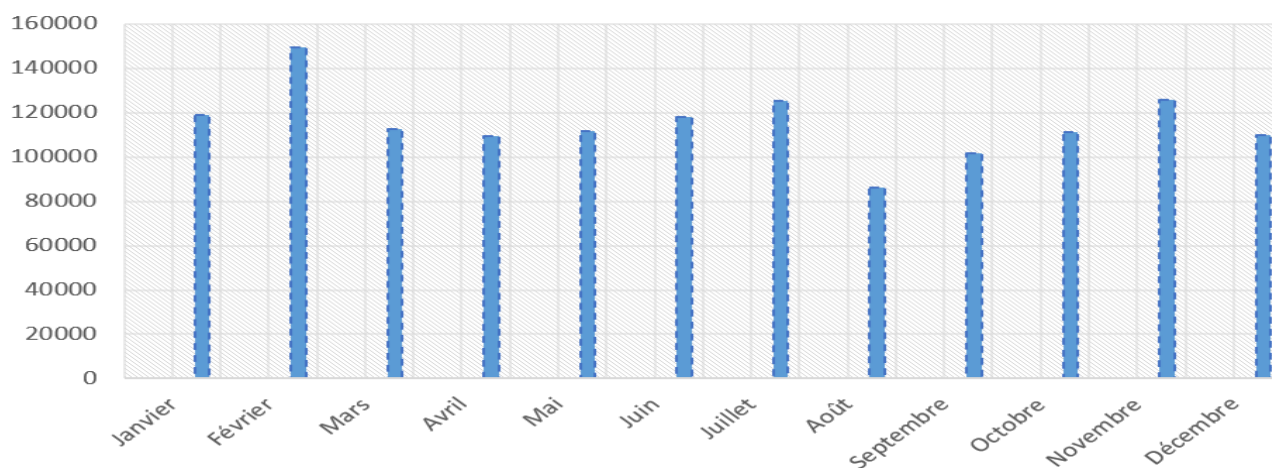


Figure 7 : Consommation mensuelle en kWh de l'entreprise enregistrée durant l'année 2022

Grâce à la même remontée d'informations à travers cette plateforme, mais au pas horaire, il est possible d'établir la courbe de charge suivante sur l'année, consommation de l'industriel heure par heure comme représentée à la figure 8 :

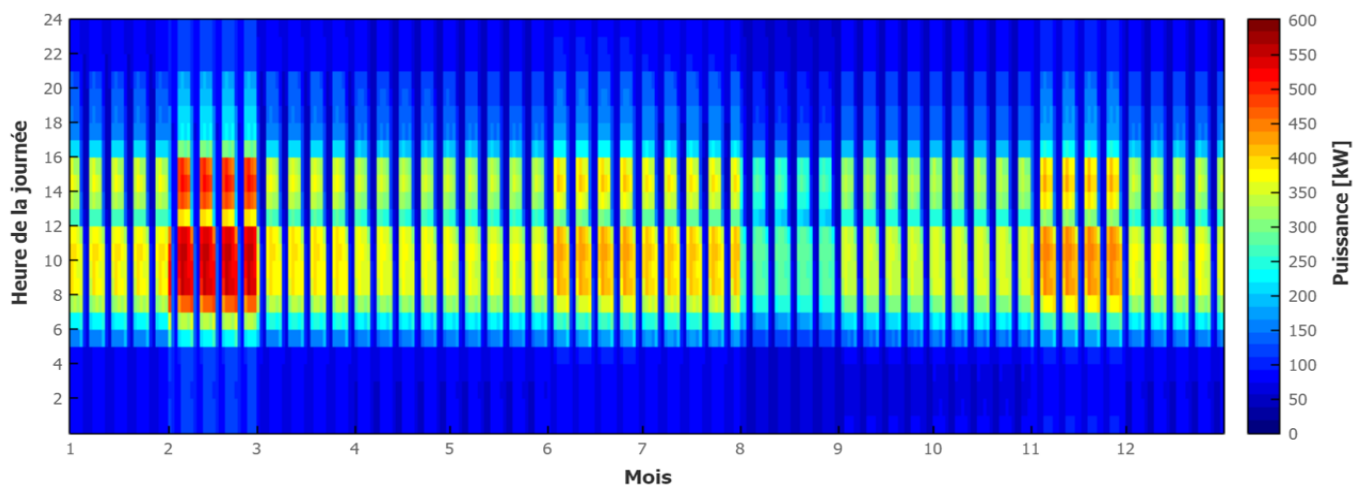


Figure 8 : « Heat map » représentant la courbe de charge sur une année au pas horaire

2.1.2 - Dimensionnement de l'installation

a) Dimensionnement du champ photovoltaïque, productibles annuel et mensuel moyens

Comme indiqué précédemment, en adéquation avec le profil de consommation de la société, une installation en autoconsommation avec vente de surplus est privilégiée. Dans ce type de centrale, **Il est prévu de couvrir toute la surface disponible de la toiture du hangar de cet industriel avec des panneaux photovoltaïques.** Celle-ci étant de 4 587,66 m², et vu la puissance des modules Jinko JKM435N-54HL4R-V (voir leur documentation technique en annexe 1 [1]) ayant une surface unitaire de 1,998 m², le nombre de panneaux est de 2 296, pour une puissance totale installée de **998,76 kWc**. Le choix s'est porté sur les modules JINKO de puissance unitaire de 435 Wc qui ont une des meilleures efficacité surfacique (environ 217,5 Wc/m²), associée à un bon rapport qualité/prix testé pendant plusieurs années par l'installateur.

Grâce à la connaissance des deux orientations Nord-Ouest (-60°) et Sud-Est (+120°), ainsi que l'inclinaison de 10° du toit, il est possible d'obtenir l'énergie susceptible d'être produite par kWc, appelée productible, à travers cette centrale grâce au logiciel PV SOL [<https://pvsol.software/>] (voir figure 9). Ce dernier, paramétré tel qu'on le voit plus bas, donne un productible annuel moyen de 951,33 kWh/kWc (voir figure 10).

Système PV

Module PV

PV*SOL Example

Orientation du champ PV Azimut : -60 °

Inclinaison : 10 °

Puissance souhaitée 499,39 kWc

Nombre de modules prédéfini 1148

Onduleur

Arrangement d'onduleur

Figure 9 : Paramètres d'entrée du logiciel PV SOL afin d'avoir les productibles moyens, demi-toiture N-O

Ce logiciel permet également d'avoir le productible mensuel moyen comme le montre la figure suivante :

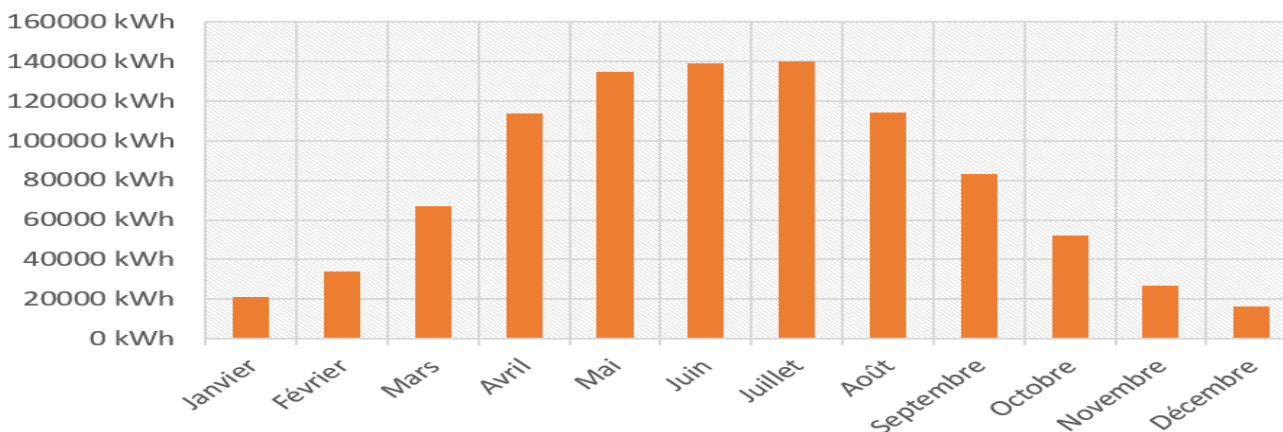


Figure 10 : Productible mensuel du champ photovoltaïque à installer, simulé sur PV SOL

b) Bilan énergétique global sans stockage

Il est maintenant possible de procéder à un bilan énergétique total de l'installation en comparant heure par heure son énergie consommée et produite, grâce aux prévisions de production provenant de PV SOL, et ce sur une durée d'un an. En effet, à l'aide des deux parties précédentes, nous disposons des données de consommation et de production afin de réaliser une simulation à l'aide d'un tableur EXCEL conçu par l'installateur.

Dans ce fichier s'effectue la première partie du bilan énergétique qui consiste à évaluer par pas horaire l'autoconsommation directe, part de l'énergie consommée qui provient directement des panneaux photovoltaïques, et le surplus, non consommée, qui doit donc être directement réinjectée sur le réseau de distribution. En effet, d'après le décret S21, l'énergie en surplus est soumise à l'obligation d'achat à hauteur de 10 c€/kWh en moyenne. Ce tarif est désormais soumis à un appel d'offres simplifiés, et ce pour les centrales de plus de 100 kWc. Cette logique suit l'algorithme simple de la figure 11 :

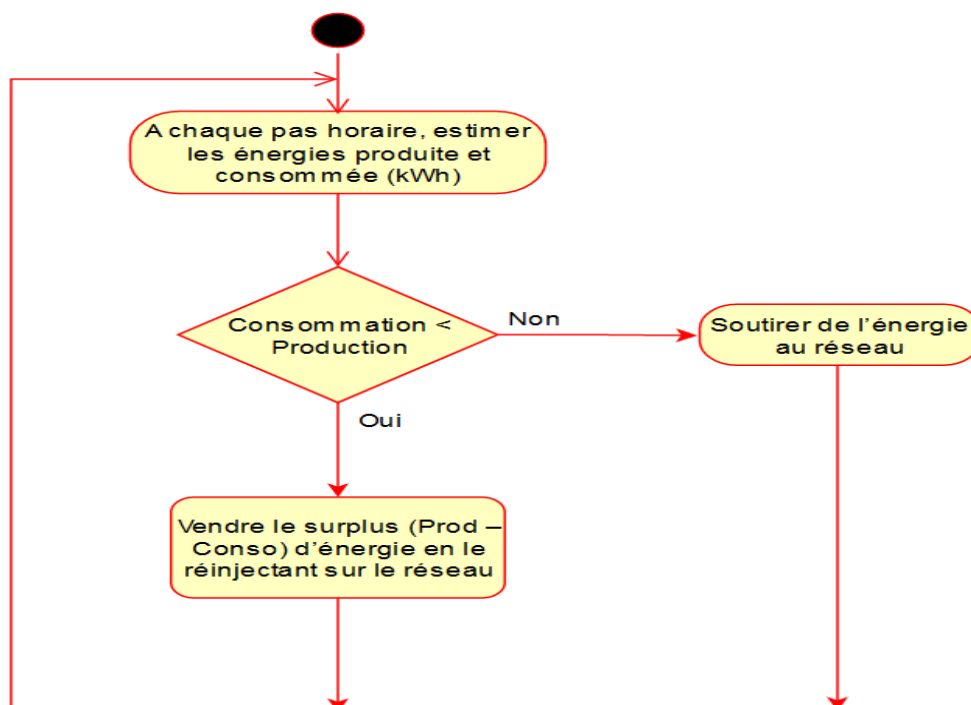


Figure 11 : Algorithme de calcul des fractions consommées et réinjectées au réseau

Il en découle la figure 12 donnant le bilan énergétique annuel sans stockage, résumant les parts mensuelles d'autoconsommation et de surplus qui peut être revendu sur le réseau par l'entreprise :

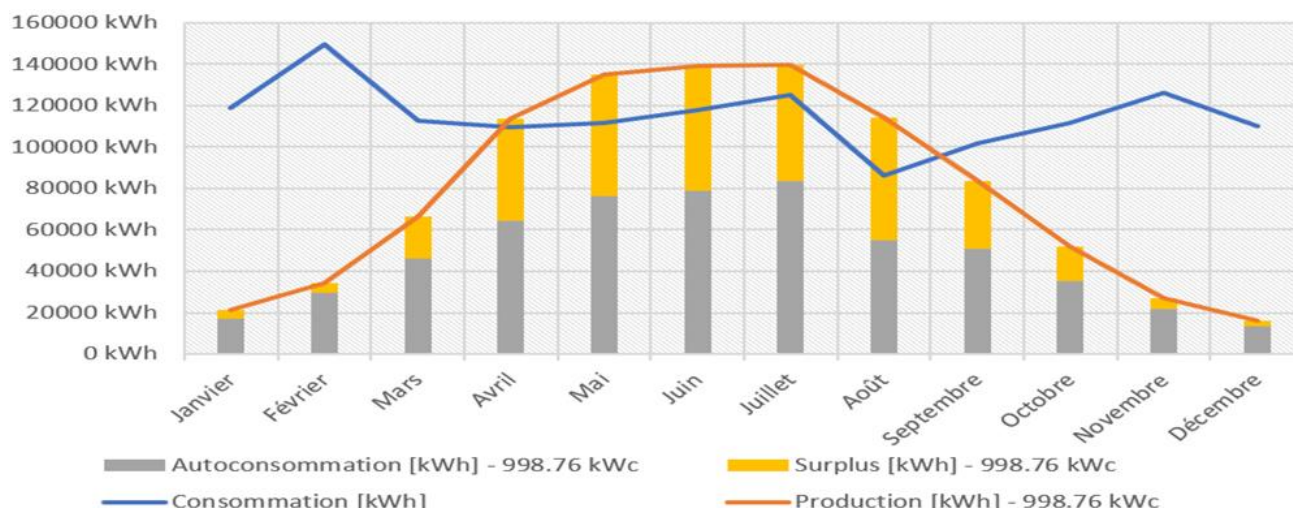


Figure 12 : Courbes donnant les parts mensuelles d'autoconsommation et de surplus par rapport à la production pour une solution sans stockage

Nous allons à présent utiliser ce bilan d'énergie afin de conforter la viabilité d'une solution avec stockage. Pour statuer sur cette viabilité, on utilise un critère empirique sur la moyenne des Taux d'AutoConsommation Direct (TACD) et d'AutoProduction (TAP), car ce sont des indicateurs de performance importants d'une centrale en autoconsommation avec vente de surplus. Ainsi Le TACD est le ratio de l'énergie autoconsommée sur l'énergie photovoltaïque produite. **Un taux de 100 %**

signifie que toute l'énergie PV produite peut être utilisée sans vente de surplus, moyennant un décalage de son utilisation grâce à une solution de stockage, c'est à dire sans aucun transfert de l'installation vers le réseau, et se calcule de la manière suivante :

$$\begin{aligned} \text{TACD} &= \frac{\text{Energie autoconsommée (kWh)}}{\text{Energie solaire produite (kWh)}} \times 100 \\ &= \frac{573\,201}{941\,631} \times 100 \approx 61\% \end{aligned}$$

Le TAP est quant à lui le ratio de l'énergie autoconsommée sur l'énergie totale consommée. Un taux de 100 % signifie que l'installation est en totale autonomie énergétique, sans aucun transfert cette fois-ci du réseau vers l'installation. Ainsi, dans les deux cas, un taux de 100 % nécessite un stockage total de la consommation afin de l'avoir disponible lors des périodes de faible production solaire. Celui-ci se calcule de la manière suivante :

$$\begin{aligned} \text{TAP} &= \frac{\text{Energie autoconsommée (kWh)}}{\text{Energie totale consommée (kWh)}} \times 100 \\ &= \frac{573\,201}{1\,380\,015} \times 100 \approx 42\% \end{aligned}$$

Si la moyenne de ces deux taux dépasse 50 %, la solution de stockage de la production solaire devient économiquement viable dans le sens où la part de l'autoconsommation va augmenter par rapport à celle du surplus afin d'en vendre le moins possible au réseau, ce qui est d'ailleurs le cas de notre étude puisque cette moyenne vaut 51,5%.

b) Bilan énergétique avec solution de stockage et son dimensionnement avec celui des onduleurs

Nous allons faire un nouveau bilan énergétique en comparant toujours heure par heure l'énergie consommée et produite sur une durée d'un an, mais avec une solution de stockage. En effet, l'avantage de cette dernière est qu'elle permet, grâce au décalage entre production et consommation, d'augmenter la part de l'autoconsommation de l'énergie solaire produite, afin que l'entreprise vende le moins possible de surplus au réseau vu le nouveau prix moins intéressant de revente au kWh.

Ainsi, toujours à l'aide des données de consommation et de production, nous pouvons réaliser une nouvelle simulation à l'aide du tableur EXCEL ou par PV SOL (voir annexe 4 [1]), en réalisant un second bilan énergétique en évaluant, toujours par pas horaire, l'autoconsommation et le surplus, qui doit donc être directement stocké en priorité si possible, sinon réinjecté dans le réseau en dernier recours. Cette simulation est réalisée grâce au nouvel algorithme plus complexe présenté à la figure 13 :

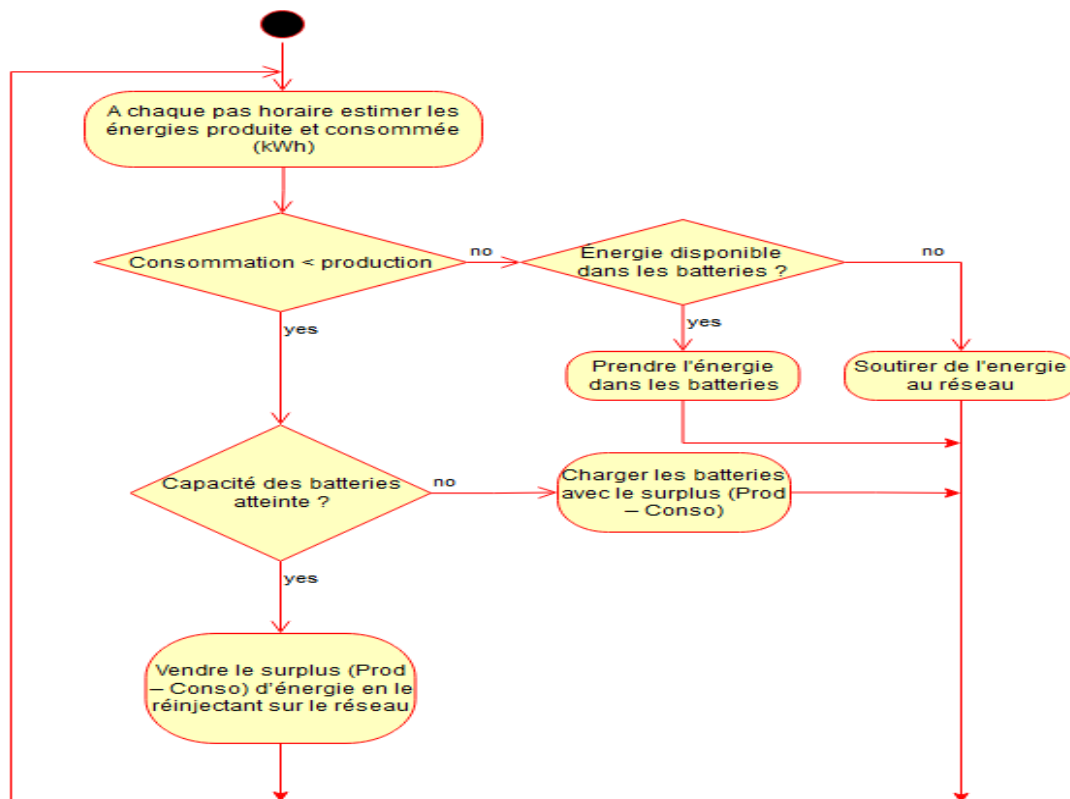


Figure 13 : Algorithme de calcul des fractions consommées, stockées et réinjectées au réseau

Il en découle l’histogramme de la figure 14 donnant le bilan énergétique annuel avec stockage, résumant toujours les parts mensuelles d’autoconsommation, incluant le stockage, et de surplus qui est revendu :

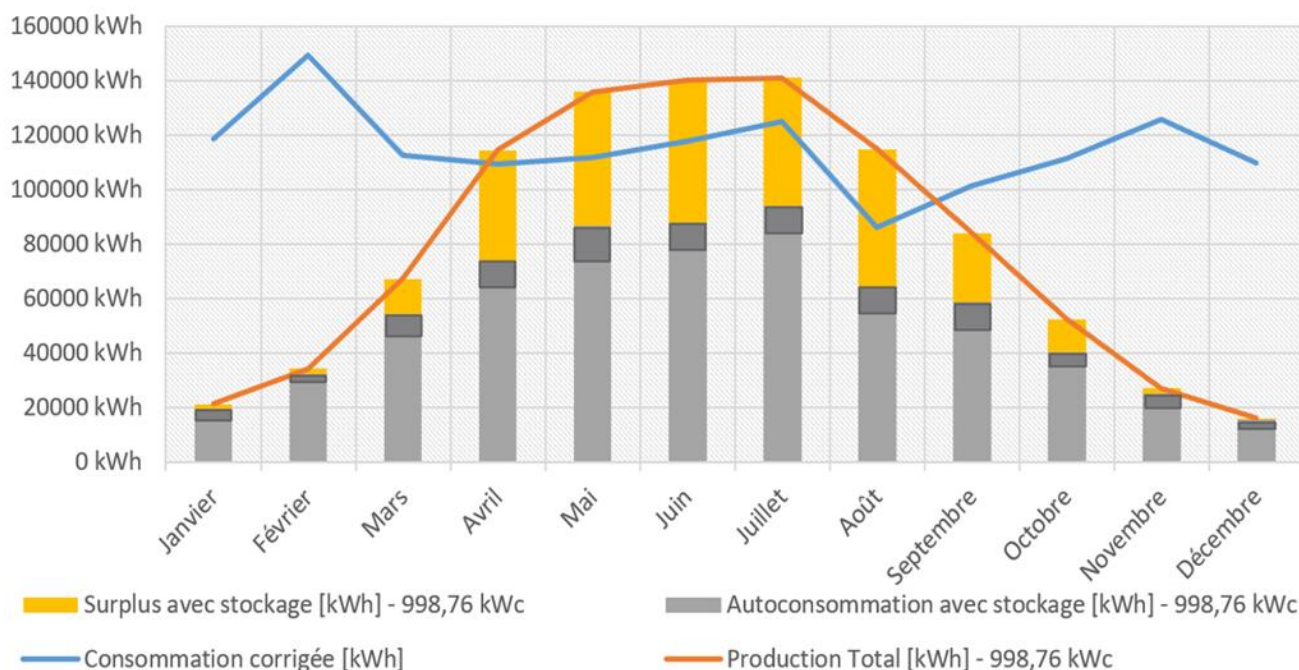


Figure 14 : Courbes donnant les parts mensuelles d’autoconsommation et de surplus par rapport à la production avec stockage dont la part est représentée en gris foncé

On remarque par ailleurs l’augmentation de la part de l’autoconsommation dans la production grâce au stockage, faisant en sorte de soutirer ou de vendre le moins d’énergie possible au réseau.

D’autre part, pour dimensionner la capacité énergétique des batteries, on doit se baser sur la charge maximale qui a été obtenue lors d’une simulation horaire. En effet, l’algorithme

précédant, implémenté dans le tableur EXCEL, a permis d'estimer l'énergie susceptible d'être stockée dans les batteries à 432 kWh. Compte tenu de ses contraintes budgétaires, l'industriel ne peut financer le total du stockage ; il a choisi de limiter la capacité de stockage à 350 kWh.

Dans cette solution, le stockage est directement connecté du côté AC de l'installation via des onduleurs dédiés ; il existe des solutions où les batteries sont connectées du côté DC : cette solution n'est pas retenue ici pour des raisons économiques. L'installateur a décidé de choisir le système de stockage / injection au réseau auprès du fabricant allemand SMA Solar Technology AG. Ce constructeur d'onduleurs dédiés aux installations PV propose l'association batterie-onduleur Sunny Tripower Storage 60 dotée de la structure présentée à la figure 15 :

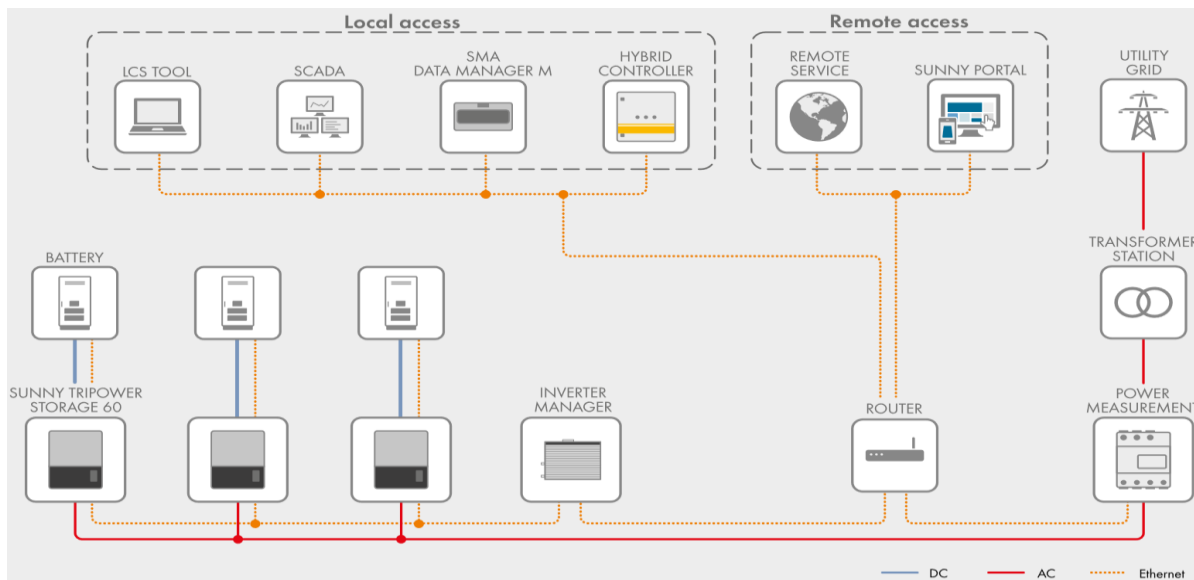


Figure 15 : Schéma synoptique du système de stockage / injection au réseau de SMA

La capacité de chaque batterie étant de 67 kWh, valeur minimale proposée par ce fabricant afin d'optimiser l'occupation spatiale, un ensemble de cinq batteries doivent donc être installées ($5 \times 67 = 335 \text{ kWh} < 350 \text{ kWh}$). Les raisons pour lesquelles l'installateur a choisi ce constructeur sont d'abord le bon rapport qualité/prix de ses produits, ainsi que son expérience de plus de 40 ans dans le domaine du photovoltaïque. C'est aussi le premier fabricant mondial d'après son chiffre d'affaires de l'année dernière. Par ailleurs, il accompagne l'installateur dans ses dimensionnements en lui apportant son expertise à travers son logiciel SUNNY DESIGN PRO (présenté par la suite), ainsi que par des formations ciblées dans le domaine du stockage, champ nouveau d'expertise pour la plupart des installateurs de PV, qui y recherchent une réelle montée en compétences.

Enfin, les onduleurs photovoltaïques proposées par SMA sont les STP 110-60 (Core 2) dont la documentation technique est donnée en annexes 3 [1]. Le choix s'est porté sur une puissance unitaire de $P_{U\text{Ond}} = 110 \text{ kW}$ car c'est aussi la valeur maximale proposée par ce constructeur, toujours pour optimiser le gain de place.

Par ailleurs, dans le domaine du photovoltaïque, il est préconisé un rapport de puissance de $r_p = 70 \%$ entre celle des onduleurs et de l'installation PV, ce qui donne leur nombre n_{Ond} à travers les formules suivantes :

$$r_p = \frac{n_{\text{Ond}} P_{U\text{Ond}}}{\text{Puissance totale installée}}$$

$$\Leftrightarrow n_{\text{Ond}} = \frac{\text{Puissance totale installée} \cdot r_p}{P_{U\text{Ond}}} = \frac{998\,760 \times 0,7}{110\,000} \approx 6$$

En effet, un $r_p = 100\%$ risquerait de surdimensionner en onduleurs l'installation car la puissance totale installée de 998,76 kWc n'est jamais réellement atteinte.

Par ailleurs, compte tenu que la tension en circuit ouvert de chaque module est de 39,16 V, et que la tension maximale de poursuite MPP des onduleurs est de 800 V, un maximum de $800/39,16 \approx 20$ modules doivent être associés en série par chaîne. Au final, 24 chaînes sont mises en parallèles par onduleur calibrés à 26 A DC (voir annexe 2 [1]), valeur supérieure à 13,8 A, qui est le courant de court-circuit de chacun des modules.

2.2 - Comparaison du dimensionnement de l'installateur avec celui de la plateforme SUNNY DESIGN

Afin de conforter ses choix de dimensionnement, l'installateur souhaite confronter son outil de dimensionnement basé sur EXCEL avec l'outil logiciel SUNNY DESIGN PRO proposé par SMA. Cette plateforme permet de concevoir et de dimensionner une installation PV quel que soit le type de projet (tertiaire ou industriel). Celle-ci peut être connectée au réseau, avec ou sans système de stockage et/ou une gestion intelligente de l'énergie, et système en site isolé ou hybride éloigné du réseau. Cette plateforme prend en compte toutes les réglementations techniques applicables aux différents composants, livre les données pertinentes pour une évaluation économique de l'installation, et conçoit des installations PV adaptées à des conditions locales spécifiques.

2.2.1 - Dimensionnement du nombre de modules photovoltaïques et leur association aux onduleurs

Pour démarrer le dimensionnement, il faut renseigner la plateforme à travers la première page de la figure 16 :

Données du projet

Nom du projet *
Installation PV d'1 MWc connectée avec stockage

Statut du projet
NOUVEAU

Client

Site du bâtiment

Recherche de l'adresse ou coordonnées (longitude, latitude) *
11 Voie de Rivière, 52190 Ocey, France

Site des données météorologiques *
Dijon, France (36 km)

Niveau de tension *
Basse tension Moyenne tension

Raccordement réseau des onduleurs
230V (230V / 400V)

Rapport de puissance nominale minimum souhaité
< 70 > %

Informations concernant le profil de charge

Type de profil de charge *
Entreprise industrielle

Profil de charge *
Exploitation minière

Consommation d'énergie annuelle
< 1380015 > kWh

Description
Exemple d'un profil de charge pour un mode mine avec une consommation d'énergie fluctuante au cours de la journée.

Données de projet avancées

Étapes suivantes
Vous avez sélectionné les données de projet et les avez modifiées le cas échéant. Dans la prochaine étape, vous pouvez définir le système qui se compose de l'installation photovoltaïque, du système de batterie et des composants de gestion de l'énergie.

Configuration de l'installation photovoltaïque

Figure 16 : Page de saisie des données du logiciel SUNNY DESIGN PRO

Ensuite vient la saisie des informations sur l'installation photovoltaïque prévue. Pour ce faire, il faut configurer le générateur photovoltaïque en sélectionnant les dimensions du hangar sur lequel sont fixés les modules PV en renseignant aussi leur puissance unitaire de 435 Wc, et ce à l'aide du dimensionnement visuel (figure 17) de la toiture :



Figure 17 : Visualisation simulée de l'installation

Ainsi le dimensionnement avec la plateforme SUNNY DESIGN a conduit à 2 256 modules de 435 Wc (contre 2 296 obtenus lors de l'étude avec le fichier EXCEL interne à l'installateur, soit moins 2 % de différence), connectés aussi par groupe de 15 à 19 en série à 6 onduleurs photovoltaïques SMA de type STP110-60 et associés en 24 chaînes en parallèle par onduleur.

2.2.2 - Dimensionnement de l'installation avec batteries de stockage

Après le dimensionnement des onduleurs, il est également possible de faire de même pour l'ajout d'un système de batteries-onduleurs comme le montre la capture de la figure 18 :



Figure 18 : Page de saisie des données avec stockage intégré

Enfin le dimensionnement des batteries-onduleurs avec cette plateforme a aussi donné cinq associations Sunny Tripower Storage 60 (voir annexe 3 [1]) confirmant la bonne étude technique menée par l'installateur à travers son fichier EXCEL afin de dimensionner correctement l'installation PV de son client.

La synthèse du dimensionnement de toute l'installation PV étudiée est le suivant, où la figure 19 présente le schéma général de l'installation avec les flux de puissance et d'énergie :

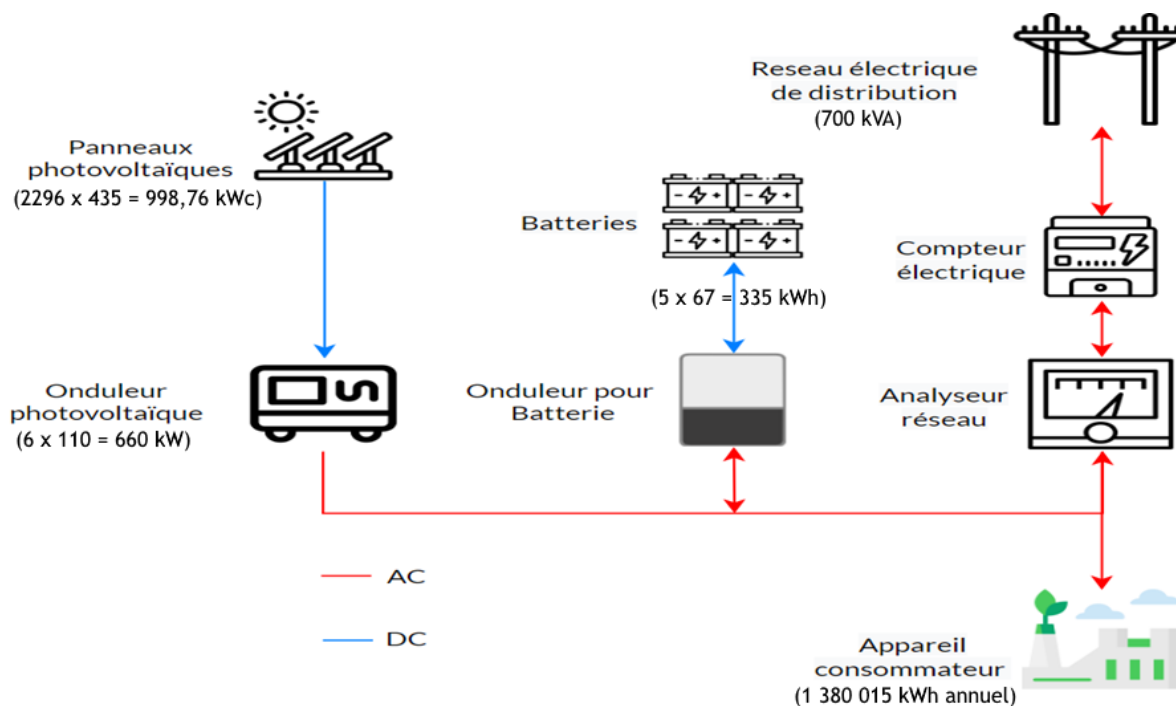


Figure 19 : Synoptique du système de production / stockage final

3 - Bilan et conclusion

Ce projet s'inscrit complètement dans une démarche de développement durable permettant à l'industriel concerné d'être le plus énergétiquement indépendant en sollicitant le moins possible le réseau public de distribution électrique pour alimenter ses charges. Pour ce faire, une solution intelligente de stockage par batteries, plus efficace, fiable et ergonomique, a été mise en place, ainsi qu'une source à énergie renouvelable de type photovoltaïque plus « propre » et donc moins polluante qu'une solution à base d'énergies fossiles.

La démarche a bien sûr un coût, estimé à environ un million d'euros, compensé dans l'optique d'un retour sur investissement de 4 ans et 3 mois grâce aux économies d'énergie et budgétaires réalisées, et la revente de surplus sur le réseau. Cette dernière sera minimisée au maximum vu son faible prix actuel du kWh afin de prioriser avant tout le stockage de l'énergie provenant du soleil pour l'autoconsommation de l'industriel. Sur la figure 20, on observe que, sur la « heat map » simulée, les pics de puissance soutirée au réseau ont été lissés, diminuant ainsi l'énergie totale consommée (comparer avec la courbe de la figure 8) :

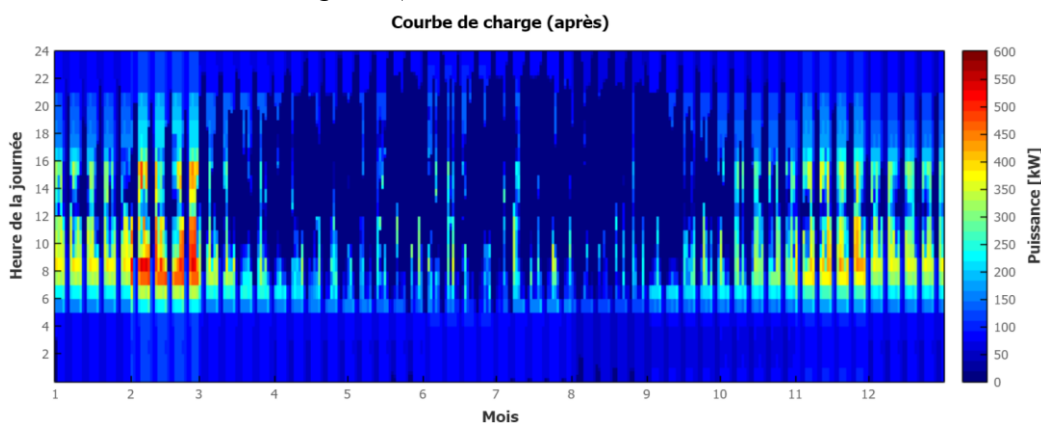


Figure 20 : « Heat map » de la courbe de charge sur une année au pas horaire avec l'installation photovoltaïque

Actuellement, le stockage est basé sur des batteries au Lithium fer phosphate bien plus adaptées au contexte photovoltaïque. Dans un futur prochain, le stockage pourrait être orienté vers des batteries sodium/ion, moins chères et plus soucieuses de la préservation de l'environnement de par l'abondance du sodium sur la planète, notamment grâce au sel marin. Cependant, ces batteries sont encore en phase de recherche et développement.

L'article « Exploitation pédagogique basée sur l'étude de l'installation photovoltaïque avec stockage de 1 MWh » [2] décrit en détail trois exploitations pédagogiques issues de différents centres d'intérêt extraits de la solution technique présentée, et ce grâce à des démarches inductives. Ces exploitations s'orientent vers trois niveaux d'étude : BAC STI2D (Sciences et Technologies de l'Industrie et du Développement Durable), BUT GEII (Bachelor Universitaire de Technologie en Génie Electrique et Informatique Industrielle), et CPGE PTSI (Classe Préparatoire aux Grandes Ecoles en Physique, Technologie et Sciences de l'Ingénieur), avec trois démarches différentes (respectivement de projet, résolution de problèmes, et scientifique) en exploitant trois centres d'intérêts du projet technique compte tenu de son envergure et sa complexité. Ainsi, trois points d'études ont été dégagés :

- Etude transversale d'une installation PV îlotée en démarche de projet pour des terminal BAC STI2D ;
- Etude de l'optimisation de cette installation dans le cas où elle serait connectée au réseau pour des 2^{ème} année de BUT GEII dans une démarche de résolution d'un problème technique ;
- Etude de l'optimisation de plusieurs installations à énergie renouvelable et évaluation des écarts entre la maquette réelle et sa version modélisée pour simulation en 2^{ème} année de CPGE de spécialité PTSI à travers une démarche cette fois-ci scientifique.

Références :

[1]: Annexes de : Étude de dimensionnement industriel d'une installation photovoltaïque de 1 MWh 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-1mwh-connectee-reseau-avec-stockage

- Annexe 1 : Documentation technique des modules PV JKM435N-54HL4R-V de la marque JINKO
- Annexe 2 : Documentation technique des onduleurs photovoltaïques STP 110-60 de la marque SMA
- Annexe 3 : Documentation technique des batteries Sunny Tripower Storage 60 de la marque SMA
- Annexe 4 : Schéma du champ PV de l'industriel réalisé grâce au logiciel PV SOL

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

Pour aller plus loin :

[a]: Christophe FRANCOIS, Les grandes fonctions de la chaîne d'énergie (ellipses, 2 016).

[b]: SMA, Systèmes de stockage à batterie ultra flexible pour les applications commerciales et industrielles, <https://www.sma-france.com/>

[c]: <https://www.photovoltaique.info/fr/>

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

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

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 :

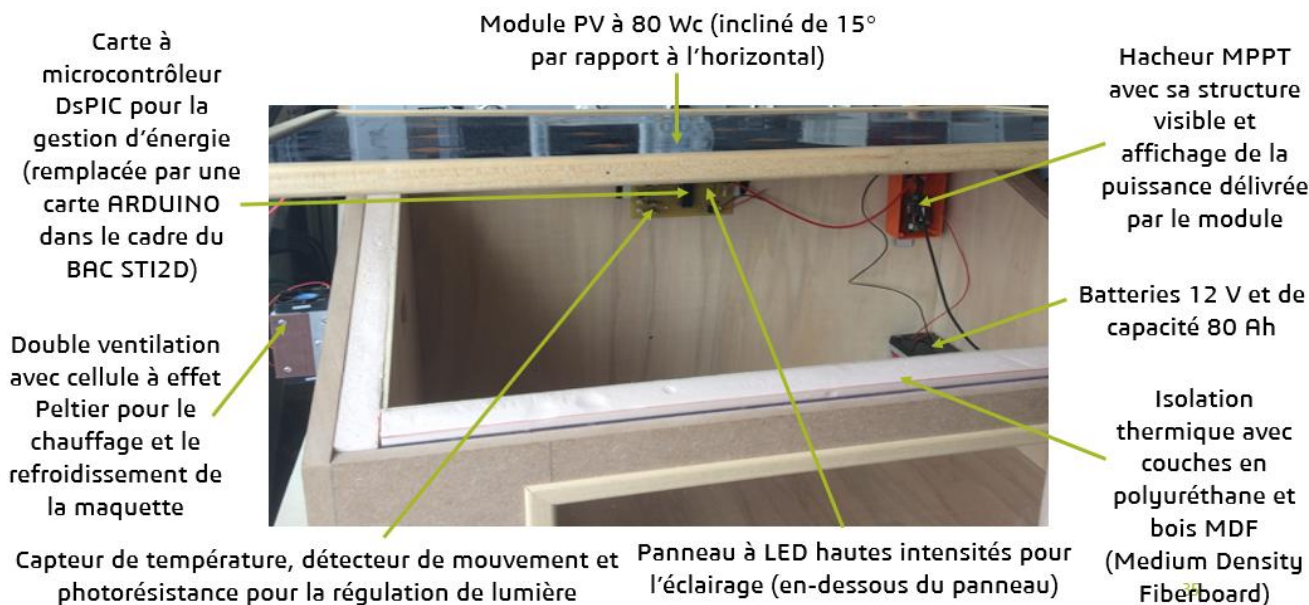


Figure 1 : Exemple en format réduit d'un attendu possible de la première exploitation pédagogique répondant au contrat pédagogique de l'annexe 1 [9], et aboutissant sur la réalisation d'un hangar d'agriculteur

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

INTITULE DU PROJET : Effectif : 4

AMELIORATION DE L'EFFICACITE ENERGETIQUE D'UN HANGAR

ENJEU *Question de société, enjeu du DD, ...*
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 :		Comment s'approprier le CDC, s'organiser, et planifier les tâches de chaque projet ?																																				
<p><u>Séance 1</u> : S'approprier le CDC des 4 projets par l'ensemble des équipes.</p> <p><u>Séance 2</u> : Décliner chaque projet en un ensemble de tâches suivant un enchaînement logique.</p> <p><u>Séance 3</u> : Se répartir ces tâches entre les membres de l'équipe du projet et les planifier grâce à un diagramme de GANTT.</p>		ENSEIGNEMENT DE SPECIALITE																																				
<p>Pistes d'évaluation : Première évaluation formative à la prochaine séquence.</p>		AC : <input checked="" type="checkbox"/>	ITEC : <input type="checkbox"/>																																			
		SIN : <input type="checkbox"/>	EE : <input checked="" type="checkbox"/>																																			
<table border="1"> <tr> <th>Situation dans la progression</th> <th>1^{ère}</th> <th>2^{ème}</th> <th>3^{ème}</th> <th>4^{ème}</th> <th>5^{ème}</th> <th>6^{ème}</th> <th>7^{ème}</th> <th>8^{ème}</th> <th>Durée :</th> <th>EFFECTIF ELEVES</th> <th>NOMBRE D'HEURES</th> <th>NOMBRES D'ELEVES PAR GROUPE</th> </tr> <tr> <td>Rentrée</td> <td>○○○○○</td> <td>○○○○○</td> <td>○○○○○</td> <td>○○○○○</td> <td>○○○○○</td> <td>○○○○○</td> <td>○○○○○</td> <td>○○○○○</td> <td rowspan="2">1 semaine</td> <td rowspan="2">1/2 groupe 16 élèves</td> <td rowspan="2">9</td> <td rowspan="2">4</td> </tr> <tr> <td>Tale</td> <td>○○○○○</td> <td>○○○○○</td> <td>○○○○○</td> <td>○○○○○</td> <td>○○○○○</td> <td>○○○○○</td> <td>○○○○○</td> <td>○○○○○</td> </tr> </table>		Situation dans la progression	1 ^{ère}	2 ^{ème}	3 ^{ème}	4 ^{ème}	5 ^{ème}	6 ^{ème}	7 ^{ème}	8 ^{ème}	Durée :	EFFECTIF ELEVES	NOMBRE D'HEURES	NOMBRES D'ELEVES PAR GROUPE	Rentrée	○○○○○	○○○○○	○○○○○	○○○○○	○○○○○	○○○○○	○○○○○	○○○○○	1 semaine	1/2 groupe 16 élèves	9	4	Tale	○○○○○	○○○○○	○○○○○	○○○○○	○○○○○	○○○○○	○○○○○	○○○○○		
Situation dans la progression	1 ^{ère}	2 ^{ème}	3 ^{ème}	4 ^{ème}	5 ^{ème}	6 ^{ème}	7 ^{ème}	8 ^{ème}	Durée :	EFFECTIF ELEVES	NOMBRE D'HEURES	NOMBRES D'ELEVES PAR GROUPE																										
Rentrée	○○○○○	○○○○○	○○○○○	○○○○○	○○○○○	○○○○○	○○○○○	○○○○○	1 semaine	1/2 groupe 16 élèves	9	4																										
Tale	○○○○○	○○○○○	○○○○○	○○○○○	○○○○○	○○○○○	○○○○○	○○○○○																														
<p>Travail interdisciplinaire : Pour l'instant aucune interdisciplinarité ne peut être envisagée</p>		<p>Compétences visées par la séquence : CO2.1. Décoder le cahier des charges d'un produit, participer, si besoin, à sa modification. CO5.1. S'impliquer dans une démarche de projet menée en groupe. CO5.4. Planifier un projet (diagramme de Gantt, chemin critique) en utilisant les outils adaptés et en prenant en compte les données technico-économiques.</p>																																				
<p>Ressources</p> <table border="1"> <tr> <td>Séance 1</td> <td>Salle de mutualisation du laboratoire STI2D, configurée en mode projet. Le support de présentation est un tableau blanc où est projeté l'énoncé du cahier des charges de chaque projet grâce à un vidéoprojecteur.</td> </tr> <tr> <td>Séance 2</td> <td>Fiches d'aide informatique sur le logiciel MINDVIEW. PC de la salle d'îlots du laboratoire STI2D, connectés au réseau local du lycée et à internet.</td> </tr> <tr> <td>Séance 3</td> <td>Fiches d'aide sur le diagramme de GANTT. PC de la salle d'îlots du laboratoire STI2D.</td> </tr> </table>		Séance 1	Salle de mutualisation du laboratoire STI2D, configurée en mode projet. Le support de présentation est un tableau blanc où est projeté l'énoncé du cahier des charges de chaque projet grâce à un vidéoprojecteur.	Séance 2	Fiches d'aide informatique sur le logiciel MINDVIEW. PC de la salle d'îlots du laboratoire STI2D, connectés au réseau local du lycée et à internet.	Séance 3	Fiches d'aide sur le diagramme de GANTT. PC de la salle d'îlots du laboratoire STI2D.																															
Séance 1	Salle de mutualisation du laboratoire STI2D, configurée en mode projet. Le support de présentation est un tableau blanc où est projeté l'énoncé du cahier des charges de chaque projet grâce à un vidéoprojecteur.																																					
Séance 2	Fiches d'aide informatique sur le logiciel MINDVIEW. PC de la salle d'îlots du laboratoire STI2D, connectés au réseau local du lycée et à internet.																																					
Séance 3	Fiches d'aide sur le diagramme de GANTT. PC de la salle d'îlots du laboratoire STI2D.																																					
<table border="1"> <thead> <tr> <th>Séance</th> <th>Question directrice</th> <th>Activités (professeur + élèves)</th> <th>Attendus à l'issue de la séance</th> <th>Durée</th> <th>Elèves</th> <th>Îlots</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>Séance 1</td> <td>Comment s'approprier le cahier des charges de chaque projet (CDC) ?</td> <td>Présentation des cahiers des charges aux 4 équipes constituées de 4 élèves chacune. Ensuite leur contenu est déroulé avec intitulé, contexte, problématique, une analyse fonctionnelle (à travers 2 diagrammes SYSML : d'exigences et de définition des blocs). Enfin les objectifs finaux sont visualisés.</td> <td>Chaque équipe doit au final choisir un CDC en y apportant éventuellement des modifications grâce à un œil critique constructif sur ce qu'elle est capable de faire. A la fin de la séance, il doit s'engager à réaliser les tâches incluses dans un contrat (voir CDC pédagogique) remis à la séance 2.</td> <td>3 h</td> <td>16</td> <td>1</td> </tr> <tr> <td>Séance 2</td> <td>Comment décliner les projets en un ensemble de tâches logiques ?</td> <td>Distribution des CDC améliorés à chaque groupe. A partir de là, chacun de ces derniers doit le décomposer en tâches et ce grâce à une carte mentale à travers l'utilisation du logiciel MINDVIEW (ou un autre).</td> <td>Chaque groupe doit avoir une vision globale des tâches à effectuer afin d'atteindre l'objectif final de leur projet, et ce à travers cette carte mentale.</td> <td>3 h</td> <td>16</td> <td>4</td> </tr> <tr> <td>Séance 3</td> <td>Comment se répartir ces tâches et les planifier ?</td> <td>A partir d'un tableur ou un autre logiciel à compléter remis dans leur dossier numérique, répartition des tâches de chaque projet entre les élèves de l'équipe concernée. Enfin, planification de ces tâches grâce à un diagramme de GANTT.</td> <td>Chaque groupe doit connaître les tâches qu'il a à effectuer dans le cadre de son projet, et surtout doit s'engager à les réaliser.</td> <td>3 h</td> <td>16</td> <td>4</td> </tr> </tbody> </table>		Séance	Question directrice	Activités (professeur + élèves)	Attendus à l'issue de la séance	Durée	Elèves	Îlots	Séance 1	Comment s'approprier le cahier des charges de chaque projet (CDC) ?	Présentation des cahiers des charges aux 4 équipes constituées de 4 élèves chacune. Ensuite leur contenu est déroulé avec intitulé, contexte, problématique, une analyse fonctionnelle (à travers 2 diagrammes SYSML : d'exigences et de définition des blocs). Enfin les objectifs finaux sont visualisés.	Chaque équipe doit au final choisir un CDC en y apportant éventuellement des modifications grâce à un œil critique constructif sur ce qu'elle est capable de faire. A la fin de la séance, il doit s'engager à réaliser les tâches incluses dans un contrat (voir CDC pédagogique) remis à la séance 2.	3 h	16	1	Séance 2	Comment décliner les projets en un ensemble de tâches logiques ?	Distribution des CDC améliorés à chaque groupe. A partir de là, chacun de ces derniers doit le décomposer en tâches et ce grâce à une carte mentale à travers l'utilisation du logiciel MINDVIEW (ou un autre).	Chaque groupe doit avoir une vision globale des tâches à effectuer afin d'atteindre l'objectif final de leur projet, et ce à travers cette carte mentale.	3 h	16	4	Séance 3	Comment se répartir ces tâches et les planifier ?	A partir d'un tableur ou un autre logiciel à compléter remis dans leur dossier numérique, répartition des tâches de chaque projet entre les élèves de l'équipe concernée. Enfin, planification de ces tâches grâce à un diagramme de GANTT.	Chaque groupe doit connaître les tâches qu'il a à effectuer dans le cadre de son projet, et surtout doit s'engager à les réaliser.	3 h	16	4									
Séance	Question directrice	Activités (professeur + élèves)	Attendus à l'issue de la séance	Durée	Elèves	Îlots																																
Séance 1	Comment s'approprier le cahier des charges de chaque projet (CDC) ?	Présentation des cahiers des charges aux 4 équipes constituées de 4 élèves chacune. Ensuite leur contenu est déroulé avec intitulé, contexte, problématique, une analyse fonctionnelle (à travers 2 diagrammes SYSML : d'exigences et de définition des blocs). Enfin les objectifs finaux sont visualisés.	Chaque équipe doit au final choisir un CDC en y apportant éventuellement des modifications grâce à un œil critique constructif sur ce qu'elle est capable de faire. A la fin de la séance, il doit s'engager à réaliser les tâches incluses dans un contrat (voir CDC pédagogique) remis à la séance 2.	3 h	16	1																																
Séance 2	Comment décliner les projets en un ensemble de tâches logiques ?	Distribution des CDC améliorés à chaque groupe. A partir de là, chacun de ces derniers doit le décomposer en tâches et ce grâce à une carte mentale à travers l'utilisation du logiciel MINDVIEW (ou un autre).	Chaque groupe doit avoir une vision globale des tâches à effectuer afin d'atteindre l'objectif final de leur projet, et ce à travers cette carte mentale.	3 h	16	4																																
Séance 3	Comment se répartir ces tâches et les planifier ?	A partir d'un tableur ou un autre logiciel à compléter remis dans leur dossier numérique, répartition des tâches de chaque projet entre les élèves de l'équipe concernée. Enfin, planification de ces tâches grâce à un diagramme de GANTT.	Chaque groupe doit connaître les tâches qu'il a à effectuer dans le cadre de son projet, et surtout doit s'engager à les réaliser.	3 h	16	4																																

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 :

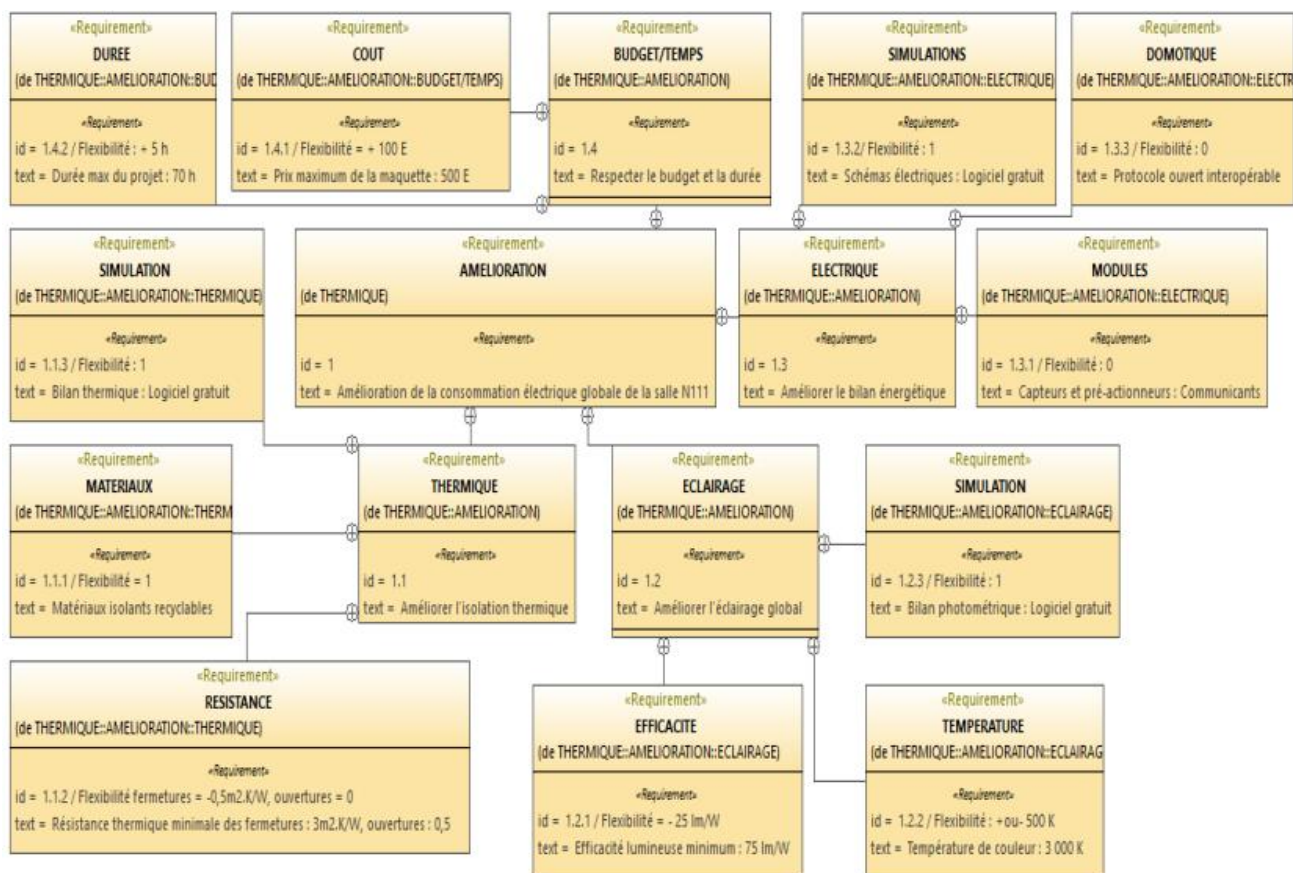


Figure 4 : Diagramme des exigences du hangar pédagogique fait sur VISUAL PARADIGM

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 :

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 ?																																	
<p>Séance 1 : Définir la structure matérielle et les composants permettant de réaliser la maquette. Séance 2 : Modéliser de façon multi-physique la maquette grâce à des logiciels de simulation. Séance 3 : Commander le matériel pour la réalisation de la maquette du hangar.</p> <p>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.</p>										ENSEIGNEMENT DE SPECIALITE :																																	
										AC : <input checked="" type="checkbox"/>	ITEC : <input type="checkbox"/>	SIN : <input type="checkbox"/>	EE : <input checked="" type="checkbox"/>																														
Situation dans la progression										NOMBRE D'HEURES		NOMBRES D'ELEVES PAR GROUPE																															
1ère	Remise	00000	Tournoi	00000	Naël	00000	Hier	00000	Pratienas	00000	EFFECTIF ELEVES		36 élèves																														
Tale		00000		00000						00000	Nombre de groupes :		4																														
Durée : 3 semaines										30		4																															
<p>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.</p>										<p>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.</p>																																	
<p>Ressources</p> <table border="1"> <tr> <td>Séance 1</td> <td>Salle de mutualisation du laboratoire STI2D configurée en mode projet. PC de cette salle, connecté à un internet. Tableau + Vidéoprojecteur.</td> </tr> <tr> <td>Séance 2</td> <td>Fiches d'accompagnement des logiciels utilisés. PC du laboratoire STI2D organisés en îlots, connectés au réseau du lycée et à internet.</td> </tr> <tr> <td>Séance 3</td> <td>IDEM</td> </tr> </table>										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	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																																										
<table border="1"> <thead> <tr> <th>Séance</th> <th>Question directrice</th> <th>Activités (professeur + élèves)</th> <th>Attendus à l'issue de la séance</th> <th>Durée</th> <th>Elèves</th> <th>Îlots</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>Séance 1</td> <td>Comment définir les matériaux électromécaniques formant la future maquette ?</td> <td>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.</td> <td>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.</td> <td>6 h</td> <td>16</td> <td>4</td> </tr> <tr> <td>Séance 2</td> <td>Comment modéliser numériquement les aspects importants de la maquette ?</td> <td>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.</td> <td>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.</td> <td>18 h</td> <td>16</td> <td>4</td> </tr> <tr> <td>Séance 3</td> <td>Comment commander et vérifier sa conformité en effectuant un inventaire ?</td> <td>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.</td> <td>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.</td> <td>5h + 1h pour la revue 2 avec 15 mn par groupe</td> <td>16</td> <td>4</td> </tr> </tbody> </table>										Séance	Question directrice	Activités (professeur + élèves)	Attendus à l'issue de la séance	Durée	Elèves	Îlots	Séance 1	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	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	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						
Séance	Question directrice	Activités (professeur + élèves)	Attendus à l'issue de la séance	Durée	Elèves	Îlots																																					
Séance 1	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	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	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.										ENSEIGNEMENT DE SPECIALITE :			
Séance 2 : La valider en comparant ses performances aux exigences fonctionnelles du CDC pédagogique.										AC : <input checked="" type="checkbox"/>	ITEC : <input type="checkbox"/>	SIN : <input type="checkbox"/>	EE : <input checked="" type="checkbox"/>
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.													
Situation dans la progression										Durée : 3 semaines			
1ère										EFFECTIF ELEVES			
2ème										NOMBRE D'HEURES			
3ème										NOMBRES D'ELEVES PAR GROUPE			
4ème										16 élèves			
5ème										4 groupes			
6ème										21			
7ème										4			
8ème													
9ème													
10ème													
11ème													
12ème													
13ème													
14ème													
15ème													
16ème													
17ème													
18ème													
19ème													
20ème													
21ème													
22ème													
23ème													
24ème													
25ème													
26ème													
27ème													
28ème													
29ème													
30ème													
31ème													
32ème													
33ème													
34ème													
35ème													
36ème													
37ème													
38ème													
39ème													
40ème													
41ème													
42ème													
43ème													
44ème													
45ème													
46ème													
47ème													
48ème													
49ème													
50ème													
51ème													
52ème													
53ème													
54ème													
55ème													
56ème													
57ème													
58ème													
59ème													
60ème													
61ème													
62ème													
63ème													
64ème													
65ème													
66ème													
67ème													
68ème													
69ème													
70ème													
71ème													
72ème													
73ème													
74ème													
75ème													
76ème													
77ème													
78ème													
79ème													
80ème													
81ème													
82ème													
83ème													
84ème													
85ème													
86ème													
87ème													
88ème													
89ème													
90ème													
91ème													
92ème													
93ème													
94ème													
95ème													
96ème													
97ème													
98ème													
99ème													
100ème													

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				
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	- Algorithmique et programmation par bloc ou script - Installation photovoltaïque : Schéma simplifié (module, batterie, charge)			
Situation dans la progression							Durée	Approche pédagogique		
1ère	Rentrée	XXXXXX	Tousaint	XXXXXX	XXXXXX	XXXXXX	16/45 heures TP	DEDUCTIVE	INDUCTIVE	X
2ème		XXXXXX	Noël	XXXXXX	XXXXXX	XXXXXX				
3ème		XXXXXX	Hiver	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) :		<ul style="list-style-type: none"> • 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). 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, mais à monter et à connecter au réseau	5	3	2,5		
					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'algorigrammes	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

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

a) L'auto-évaluation formative et l'évaluation sommative

À la fin de chaque partie de l'énoncé des TP, les élèves peuvent s'auto-évaluer sur certains critères de quelques compétences. En effet, comme l'évaluation de toutes les compétences visées par la séquence risque d'être difficile à réaliser pour les 15 élèves pendant les 4 séances, on peut déléguer ce travail sur certaines, les autres étant évaluées de façon sommative grâce aux comptes rendus de leurs travaux pratiques.

b) Présentation d'un attendu du TP de la séance 3

N'ayant pas pu expérimenter l'exploitation en condition réelle de BUT GE2I, nous l'avons néanmoins réalisé avec un groupe de 3 étudiants de première année de Master MEEF dans le cadre de l'Unité d'Enseignement UE 5.1 « Consolidation du socle de connaissances scientifiques et techniques ».

L'énoncé de TP, visant la validation des compétences de ce niveau d'étude, a permis d'abord la simulation sur le logiciel MATLAB Simscape d'un panneau photovoltaïque connecté au réseau de distribution publique d'électricité. Ensuite, une validation des résultats d'optimisation simulés (grâce à un régulateur MPPT) a été effectuée. La figure 10 présente la modélisation multiphysique MATLAB d'une installation photovoltaïque connectée de 1,2 kWc, correspondant au modèle fourni lors de la séance 3 de la séquence pédagogique précédente :

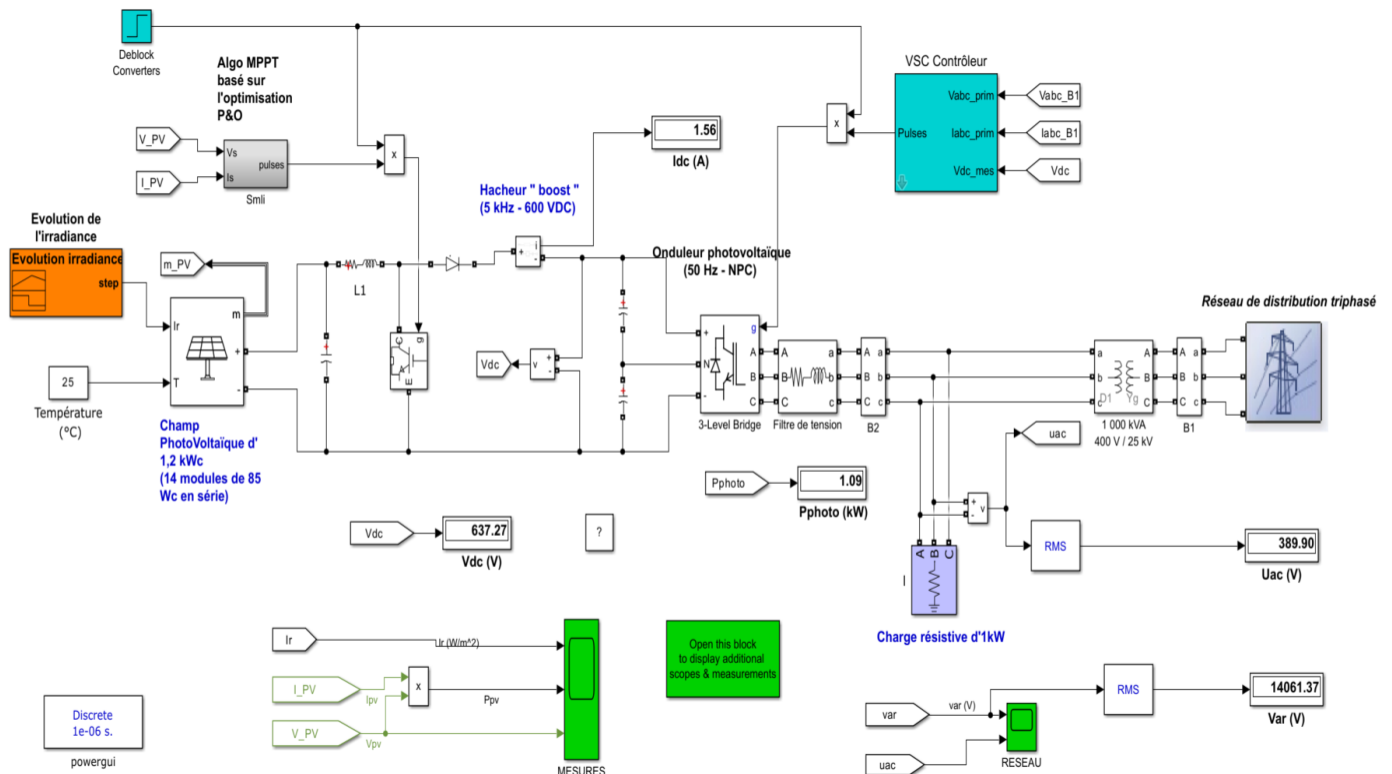
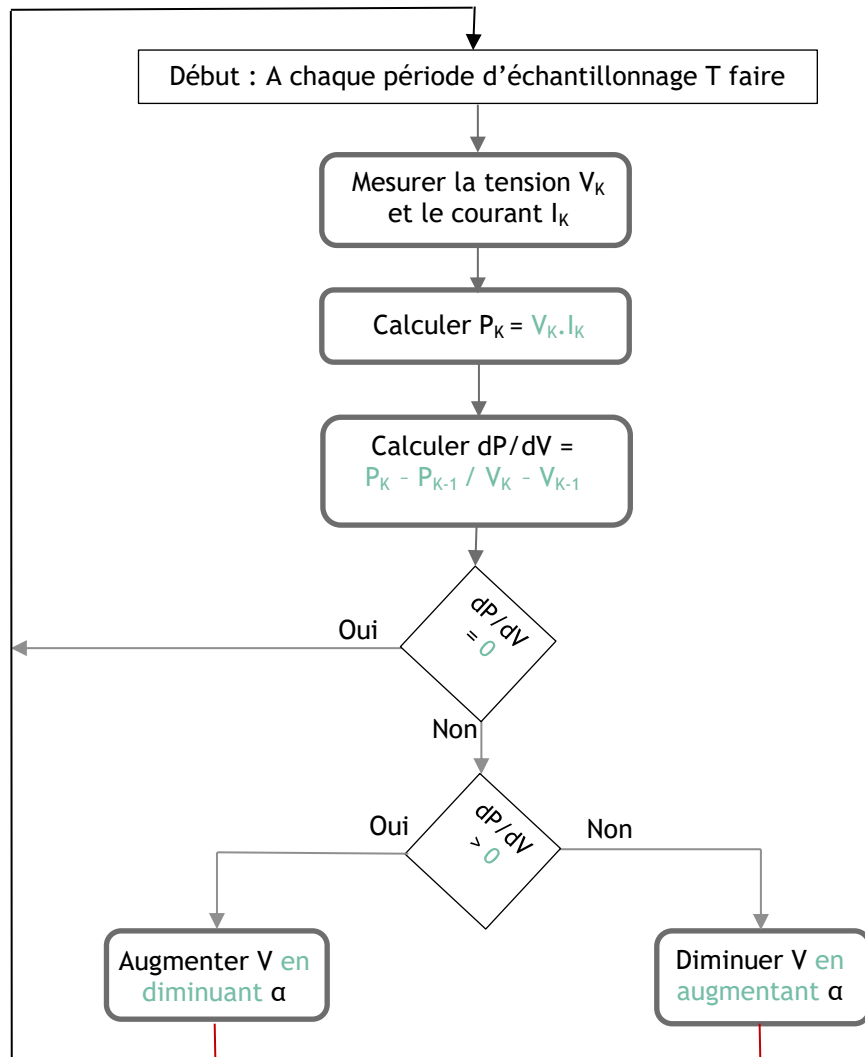


Figure 10 : Schéma de simulation d'une installation PV avec injection au réseau (annexe 7 [9])

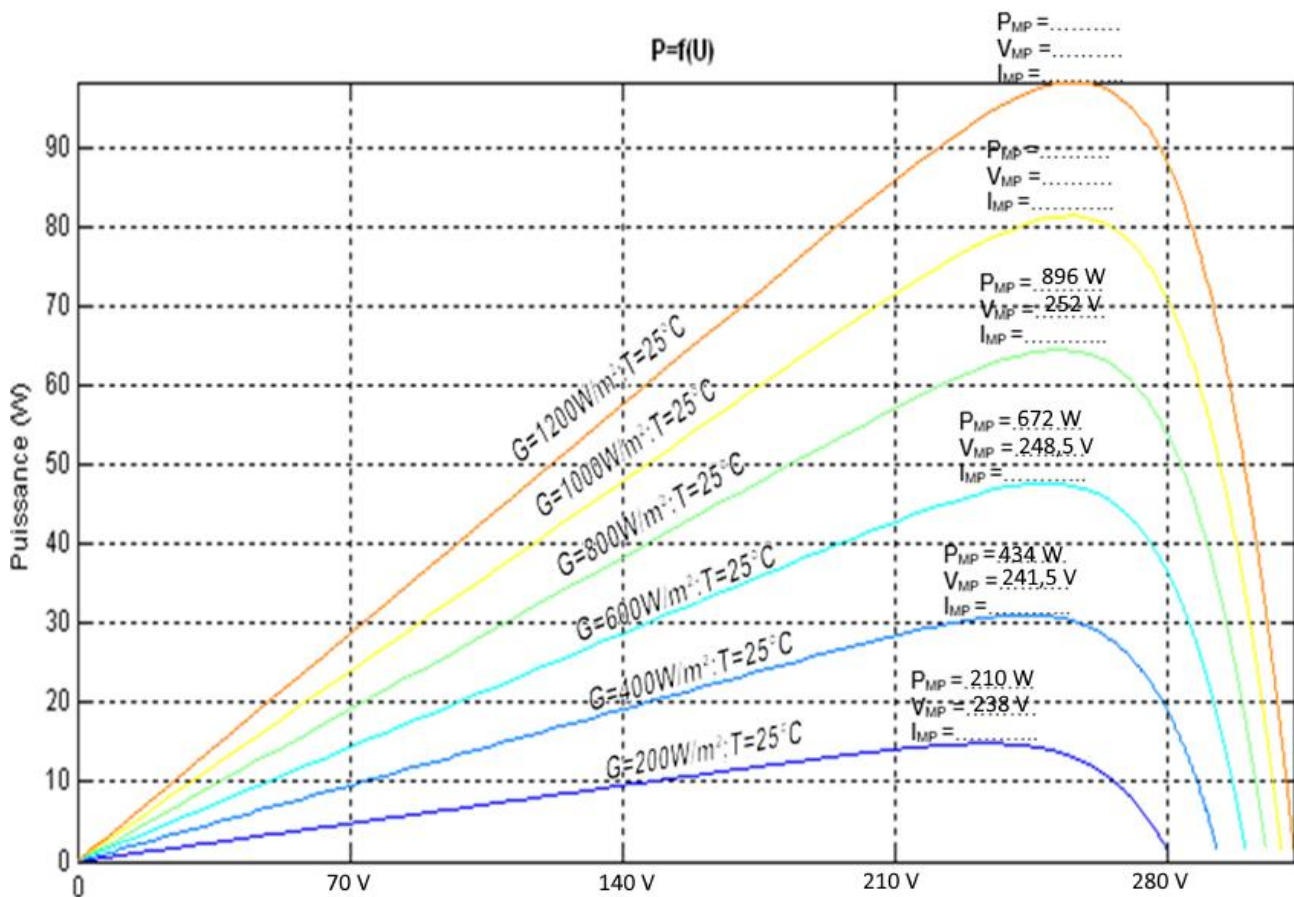
Dans le cadre de cette simulation, il faut tout d'abord que le groupe concerné implémente l'algorithme suivant en complétant le script MATLAB situé dans le bloc fonction Smlt :



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 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 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 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 B3 : Valider un modèle - Vérifier la cohérence du modèle choisi en confrontant les résultats analytiques et/ou numériques aux résultats expérimentaux - Modifier les paramètres et enrichir le modèle pour minimiser l'écart entre les résultats analytiques et/ou numériques et les résultats expérimentaux		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 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		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					
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													
Situation dans la progression						Durée 8 Heures							
1ère	Rentrée	XXXXXX	Toussaint	XXXXXX	Noël	XXXXXX	Hiver	XXXXXX	Printemps	XXXXXX	Eté	Approche pédagogique DEDUCTIVE INDUCTIVE X	
Objectifs opérationnels des 4 séances (4x2h)		<ul style="list-style-type: none"> 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					
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. 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.				Systèmes dont le module PV isolé + Charges		4	4	1,5			
						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'issue 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 :

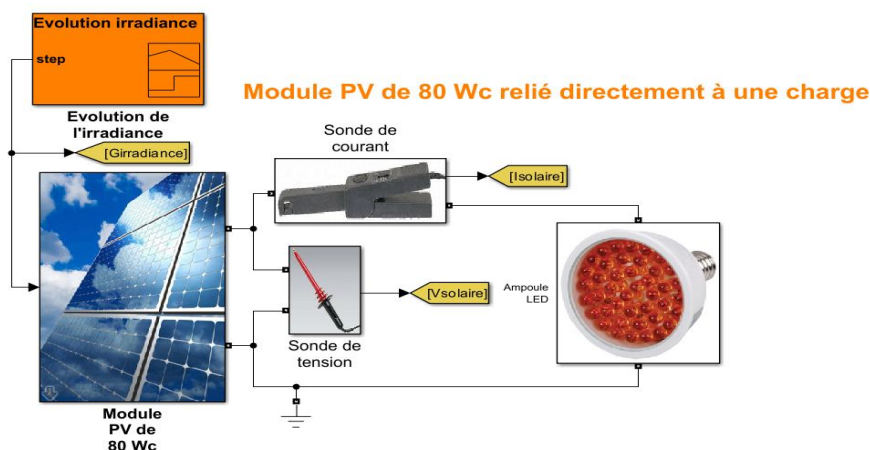
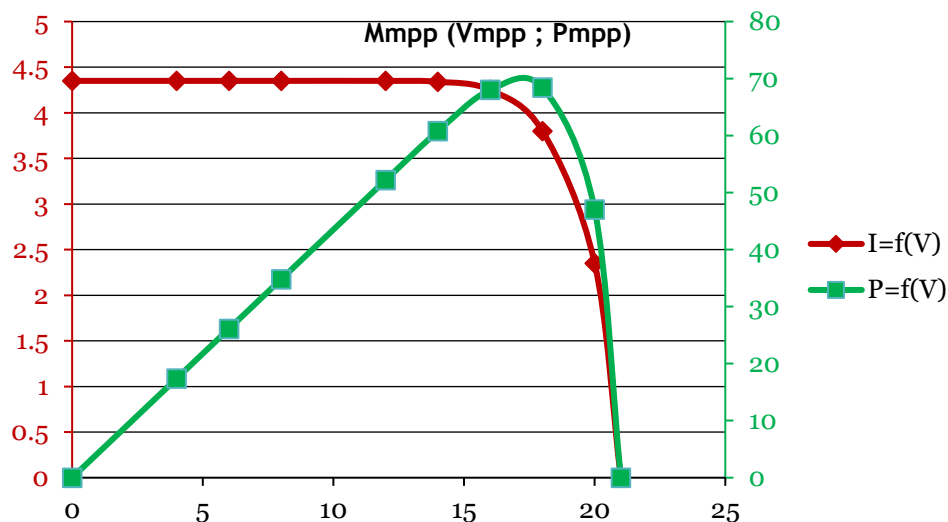


Figure 12 : Schéma de simulation de la structure de base

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 :

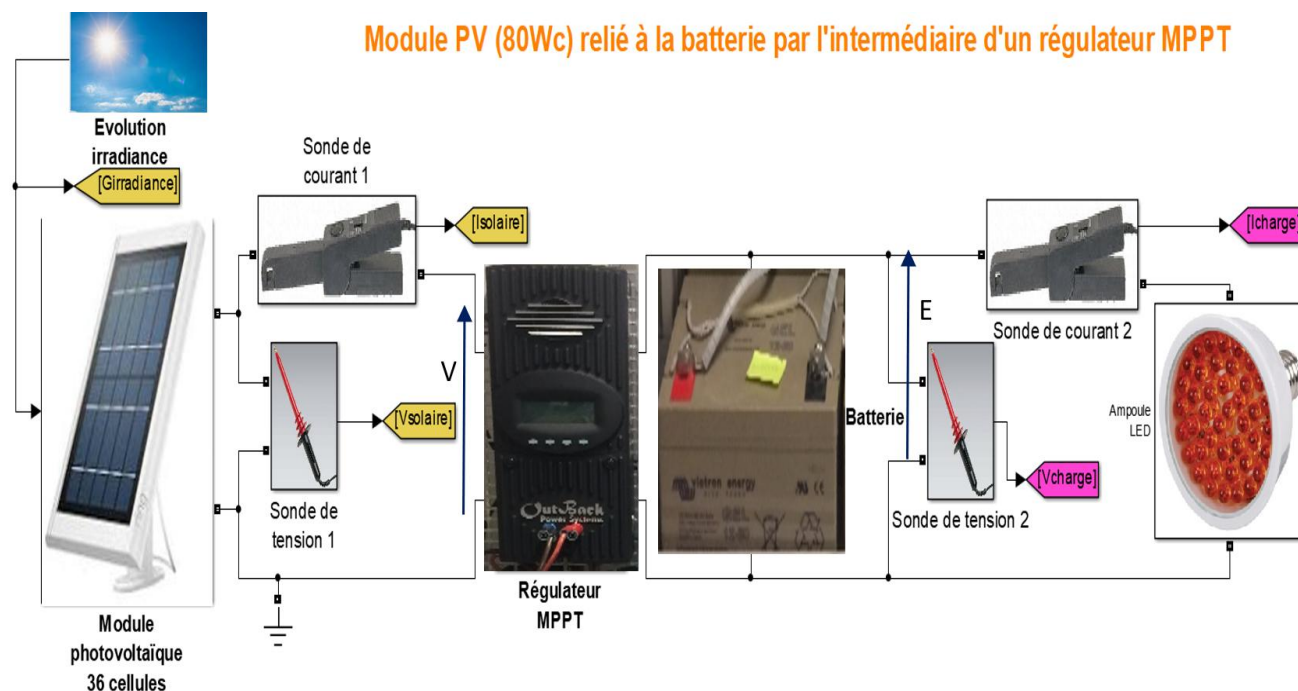


Figure 13 : Schéma de simulation avec un régulateur MPPT et une batterie

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 :

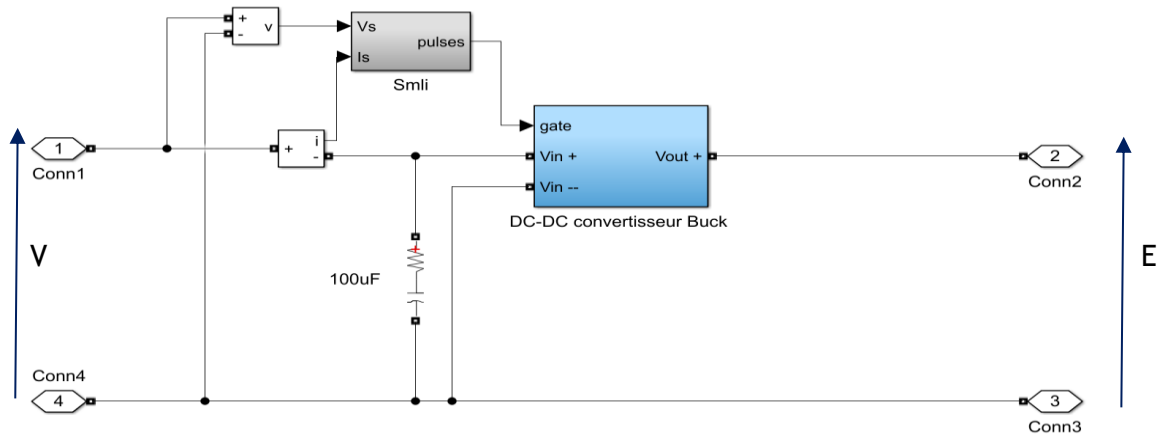


Figure 14 : Schéma de contrôle de la fonction MPPT d'un panneau photovoltaïque

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 :

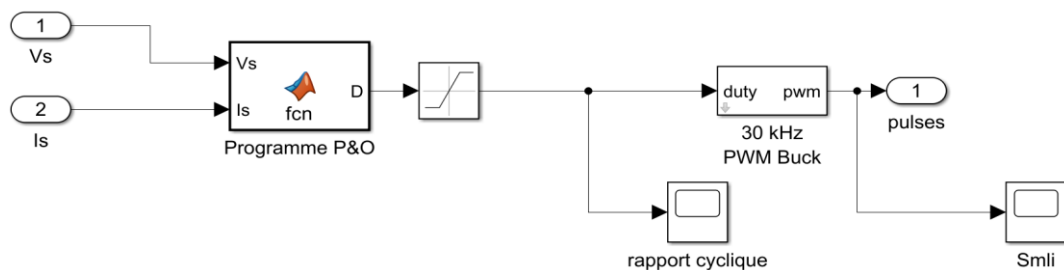


Figure 15 : Fonction de recherche du point à puissance maximale

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
else
    D = Dav;
end
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 :

$G (W/m^2)$	200	400	600	800	1000	1200
$P_{MPPS} = V_{MPPS} \cdot I_{MPPS} (W)$	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 :

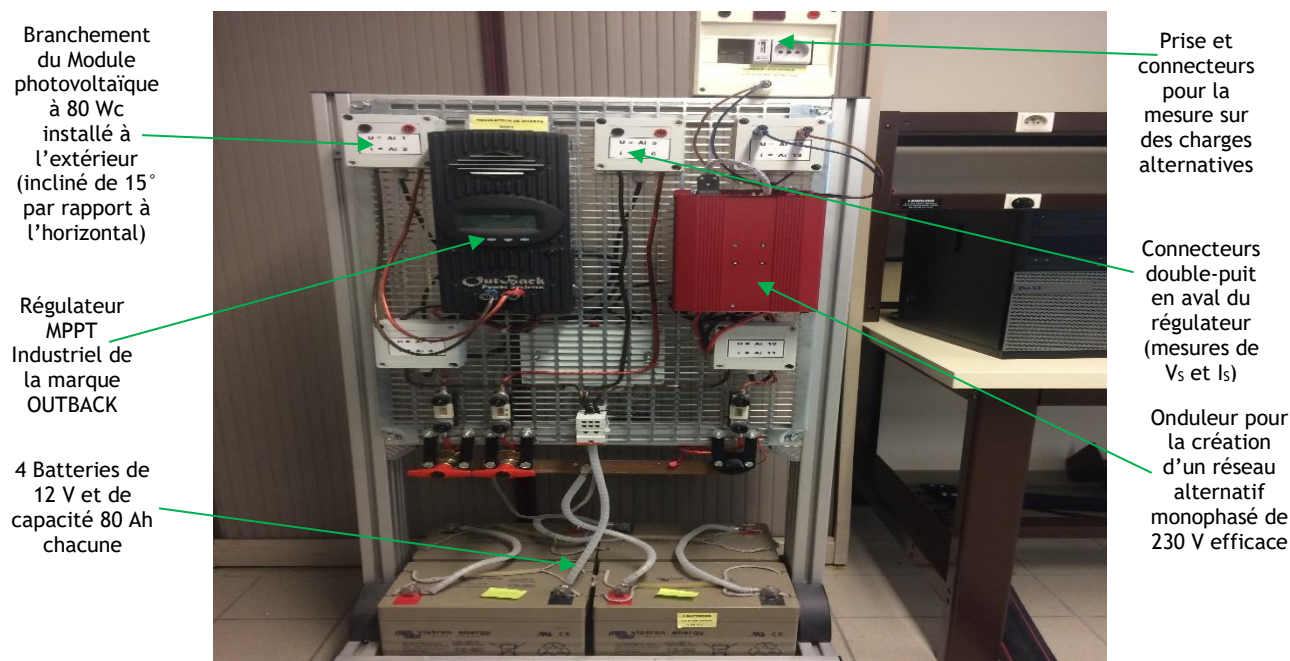


Figure 17 : Dispositif expérimental de régulation MPPT

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 :

$G (W/m^2)$	200	400	600	800	1000
$P_{MPPS} (W)$	18	30	47	68	82
$P_{MPPR} (W)$	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