

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

Culture Sciences
de l'Ingénieur

La Revue
3E.I

Omar RAMI-YAHYAOUÏ¹

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 :

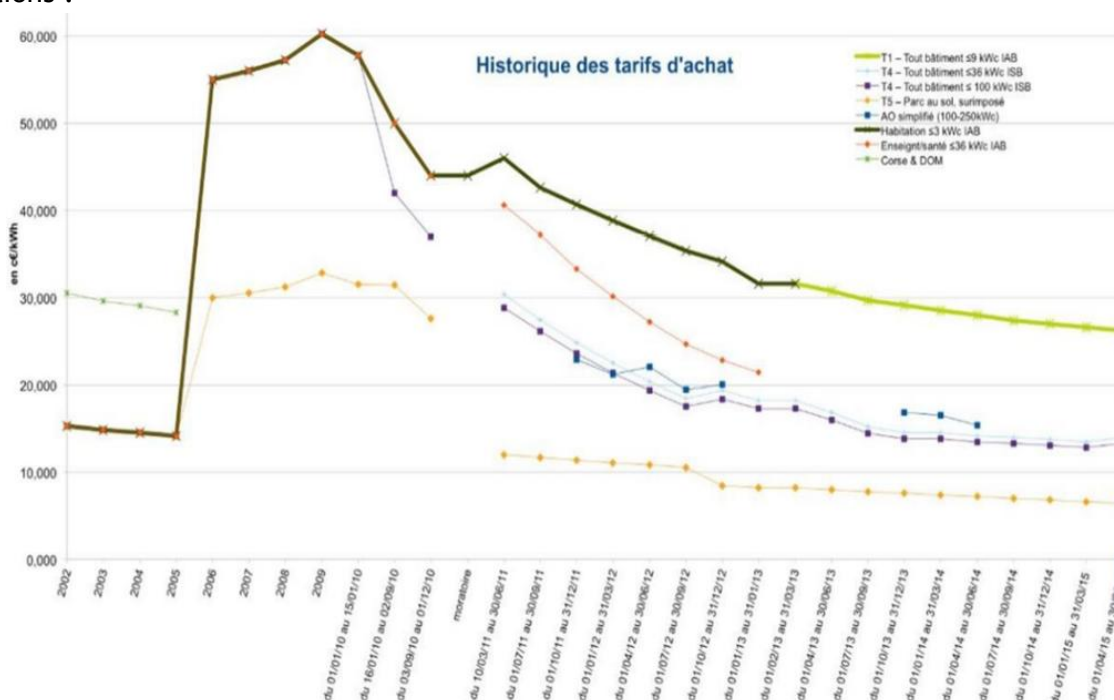


Figure 1 : Courbes représentant les évolutions des tarifs d'achat de la filière vente de la production photovoltaïque en fonction de son installation, source « photovoltaïque.info »

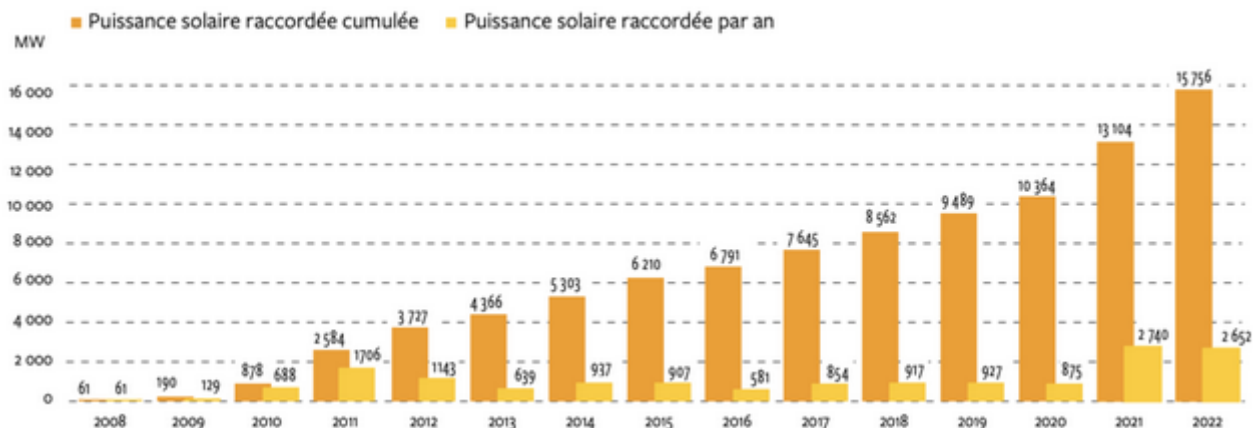


Figure 2 : Évolution de la puissance solaire raccordée sur le réseau de distribution électrique français, source RTE (gestionnaire du Réseau de Transport d'Électricité)

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 ensemblier 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 [6]).

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 ensemblier 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.

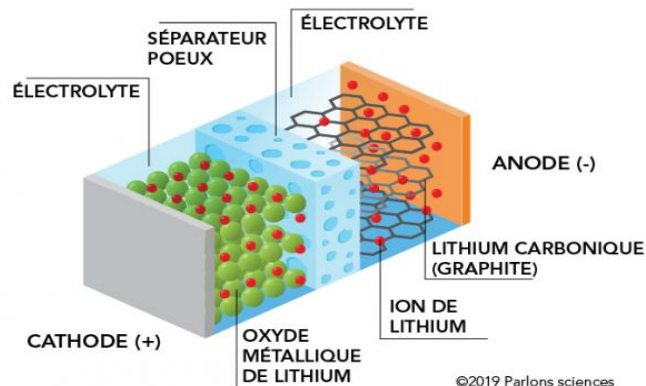


Figure 5 : Composition interne d'une batterie de type LFP

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.

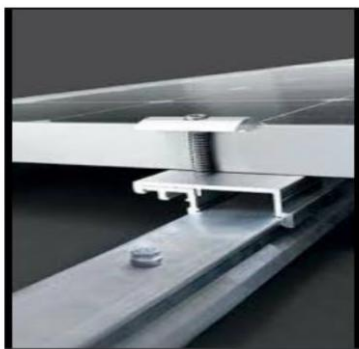


Figure 6 : Système d'intégration d'un module en surimposé

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 :

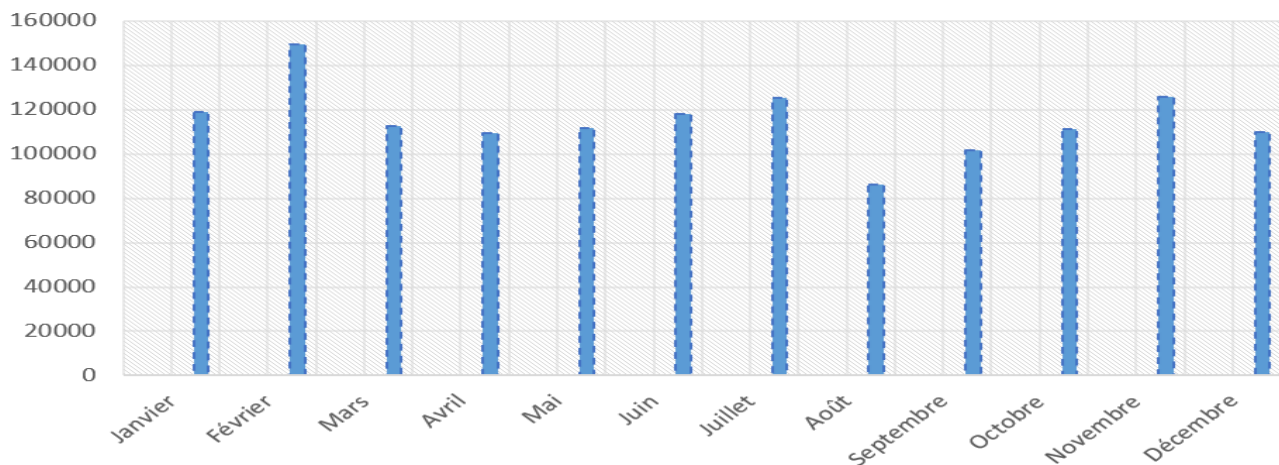


Figure 7 : Consommation mensuelle en kWh de l'entreprise enregistrée durant l'année 2022

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 :

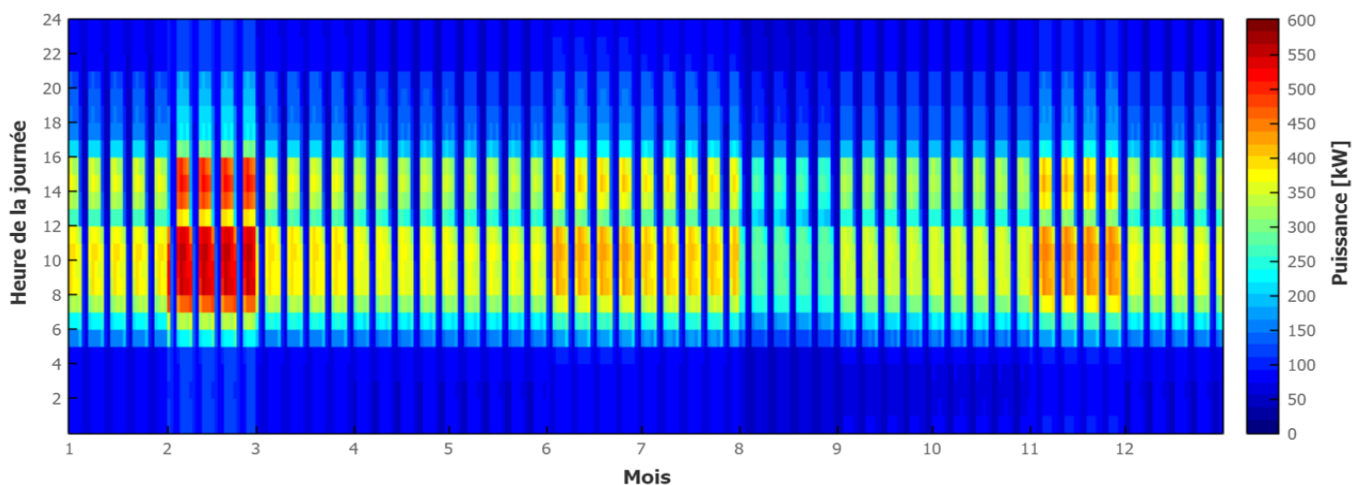


Figure 8 : « Heat map » représentant la courbe de charge sur une année au pas horaire

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 [6]) 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).

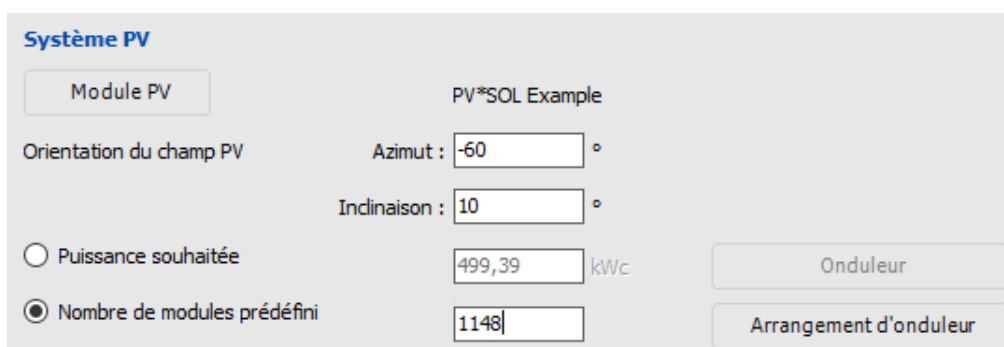


Figure 9 : Paramètres d'entrée du logiciel PV SOL afin d'avoir les productibles moyens, demi-toiture N-O

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

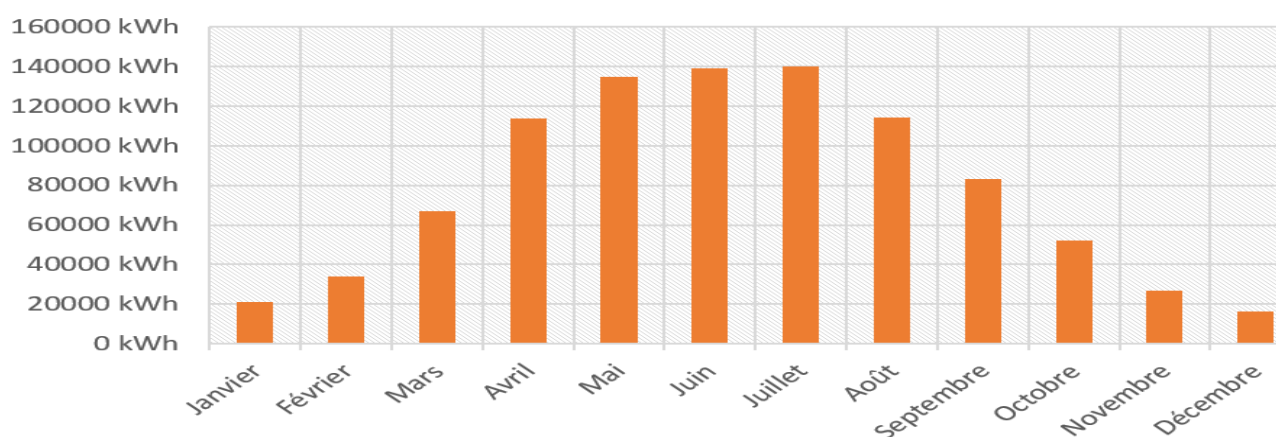


Figure 10 : Productible mensuel du champ photovoltaïque à installer, simulé sur PV SOL

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 simplifiées, et ce pour les centrales de plus de 100 kWc. Cette logique suit l'algorithme simple de la figure 11 :

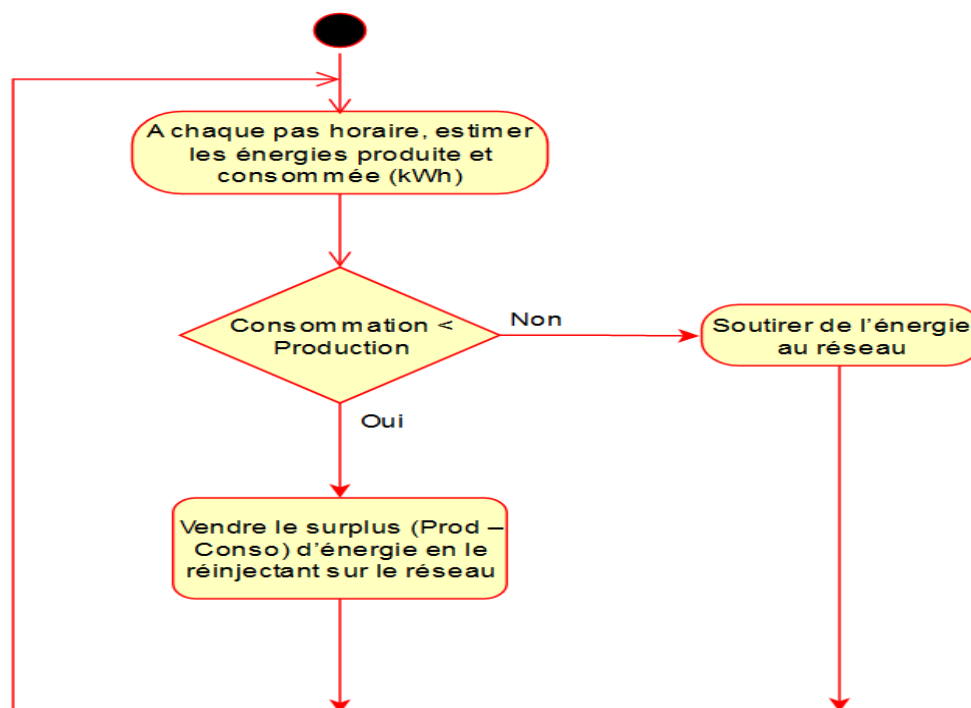


Figure 11 : Algorithme de calcul des fractions consommées et réinjectées au réseau

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 :

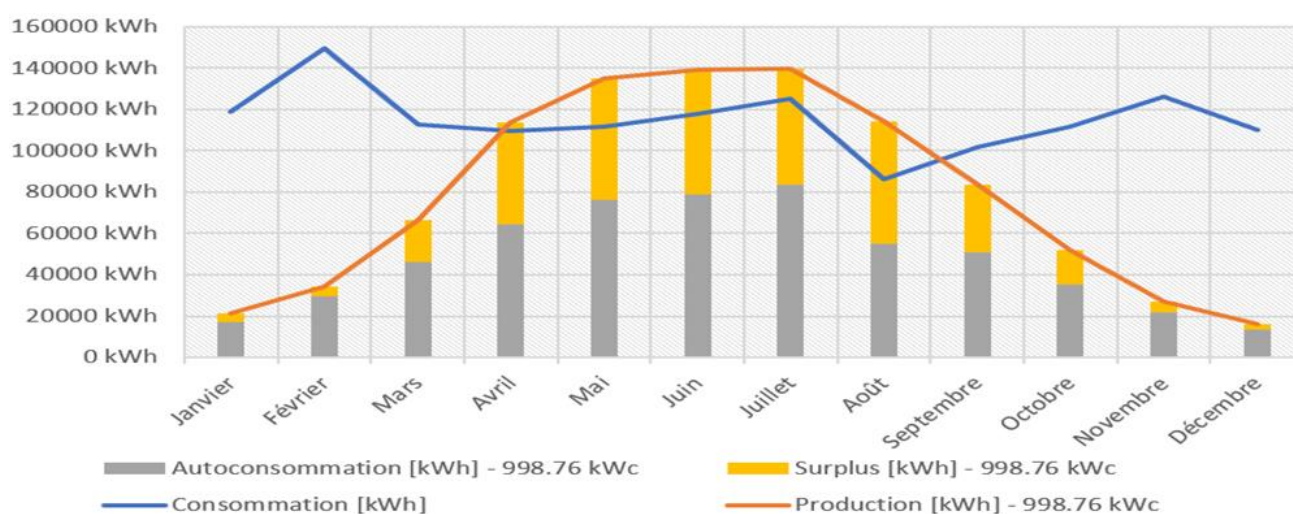


Figure 12 : Courbes donnant les parts mensuelles d'autoconsommation et de surplus par rapport à la production pour une solution sans stockage

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 :**

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

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 :

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

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 [6]), 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 :

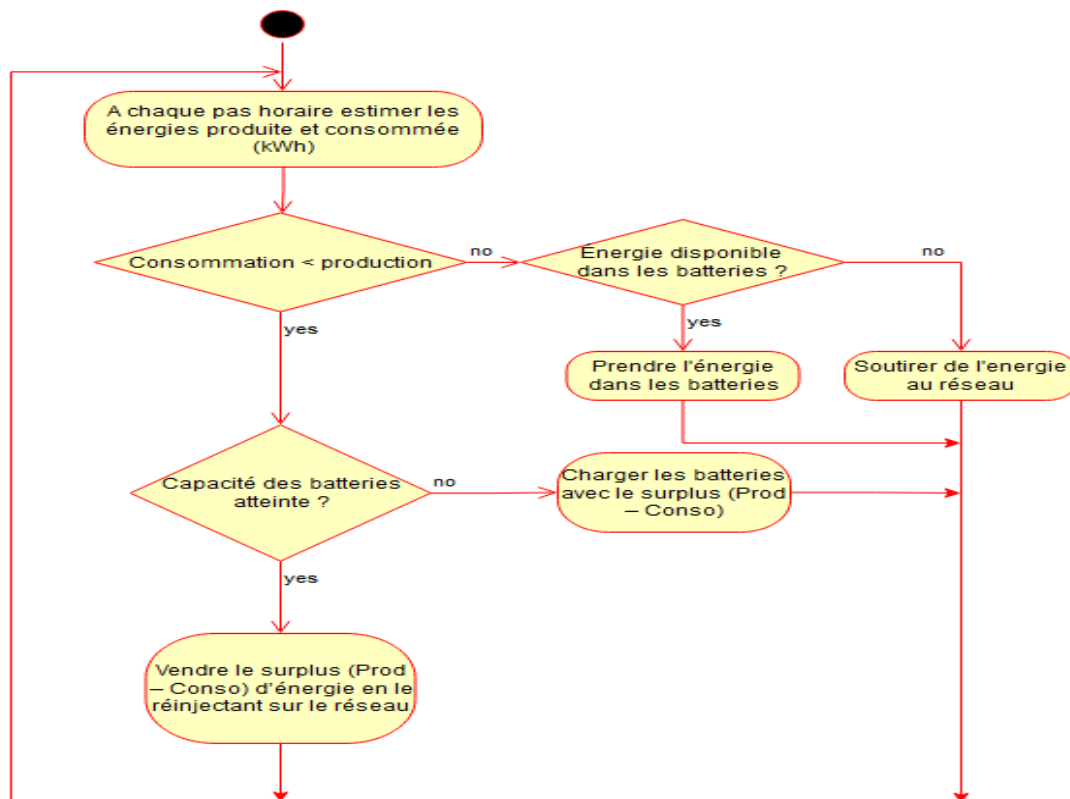


Figure 13 : Algorithme de calcul des fractions consommées, stockées et réinjectées au réseau

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 :

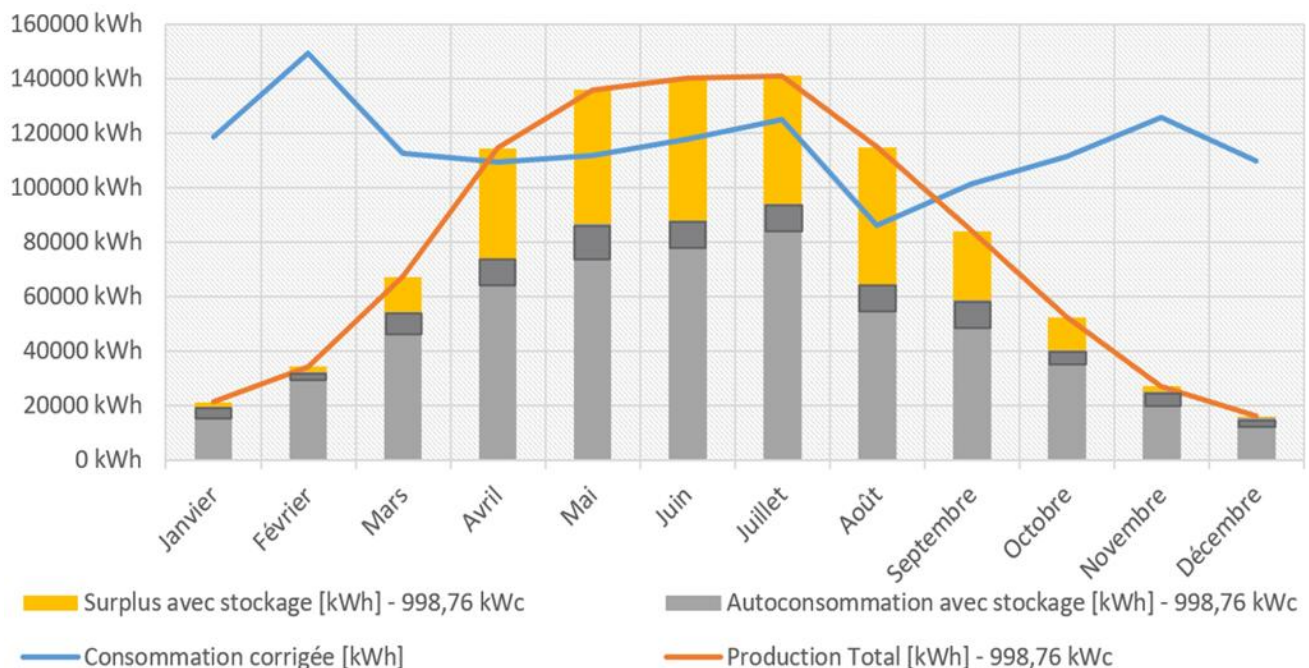


Figure 14 : Courbes donnant les parts mensuelles d'autoconsommation et de surplus par rapport à la production avec stockage dont la part est représentée en gris foncé

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 :

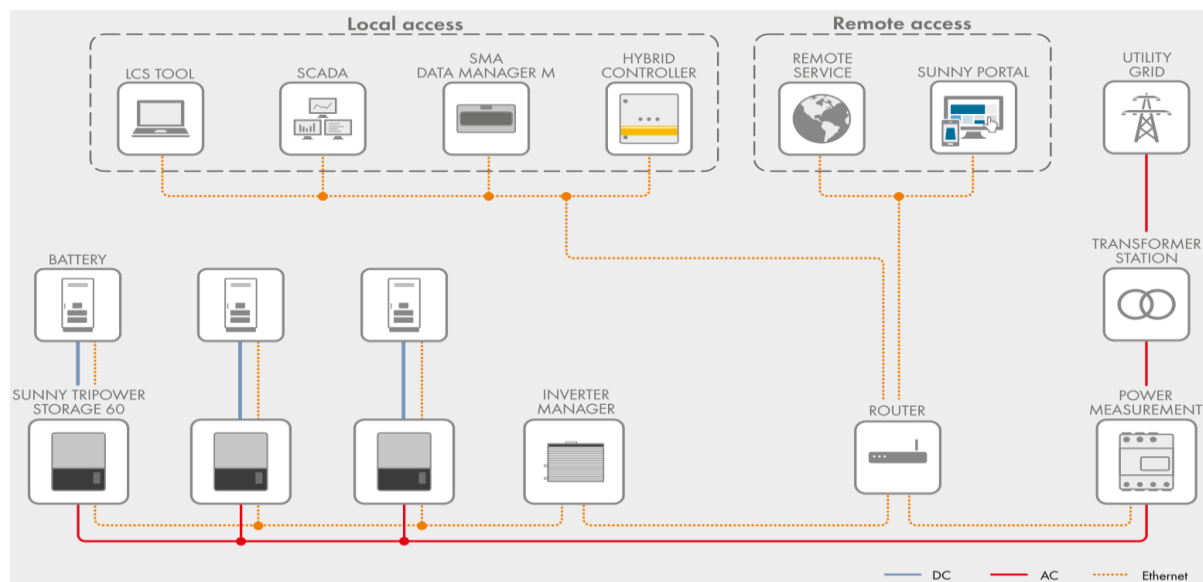


Figure 15 : Schéma synoptique du système de stockage / injection au réseau de SMA

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 [6]. Le choix s'est porté sur une puissance unitaire de $P_{UOnd} = 110 \text{ kW}$ 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 :

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

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

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 [6]), 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
+ Nouveau client

Site du bâtiment

Recherche de l'adresse ou coordonnées (longitude, latitude) *
11 Voie de Rivière, 52190 Occey, 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 + Nouveau profil de charge

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 :

Système de batteries

☒ Tenir compte du banc de batteries

☐ monophasé ☒ triphasé ☐ Multiclustor Box

Utilisation * ?
Optimisation de l'autoconsommation

Filtre d'appareils

Appareil*	Nombre	Description	Réglages
 Sunny Tripower Storage 60	5	Pour optimiser l'autoconsommation avec effet d'écrêtage des pointes de charge de grandes installations photovoltaïques avec des batteries lithium-ion haute tension. Plage de tension de la batterie : 575 V - 1000 V	Batteries: SMA, Storage Business 67 kWh (67,00 kWh) Capacité: 67,00 kWh Pourcentage utilisable: 100 %

? L'une des conditions préalables pour exploiter l'appareil est l'utilisation d'un Inverter Manager. Par ailleurs, un analyseur de réseau UMG 604-PRO de la société Janitza electronics GmbH est requis.

Capacité nominale totale: 335,00 kWh
Pourcentage utilisable: 100 %
Puissance de charge maximale du système de batterie: 300,00 kW
Puissance de décharge maximale du système de batterie: 300,00 kW

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 [6]) 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 :

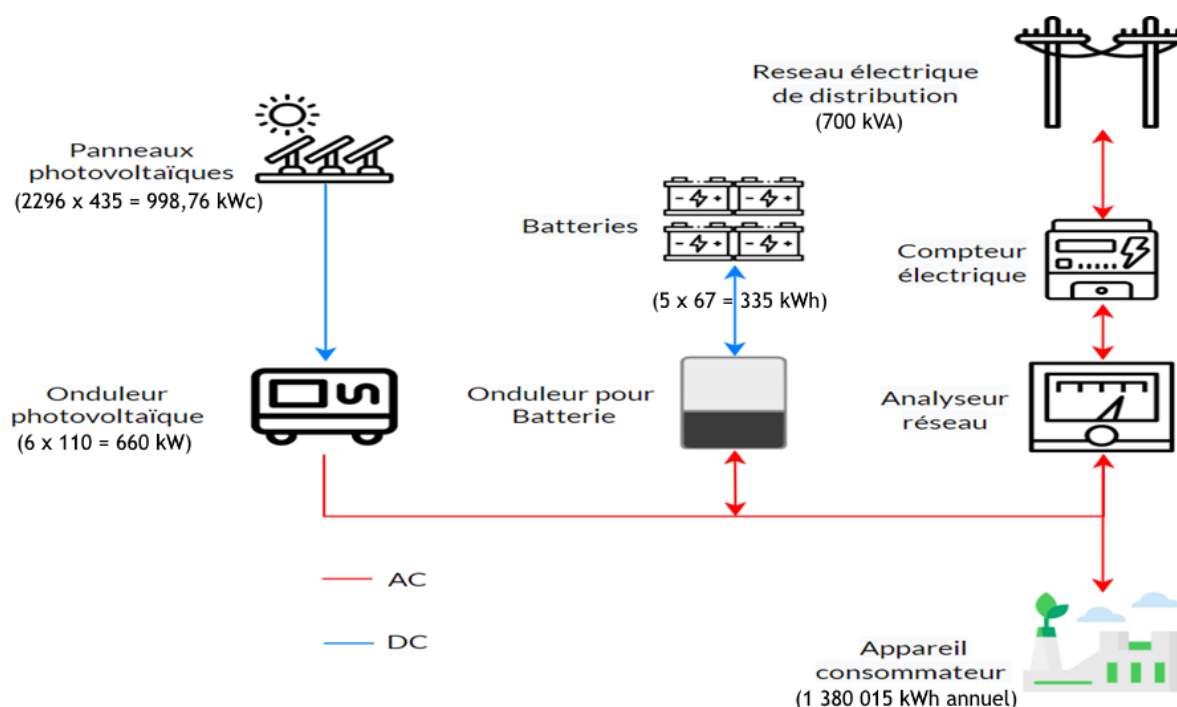


Figure 19 : Synoptique du système de production / stockage final

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) :

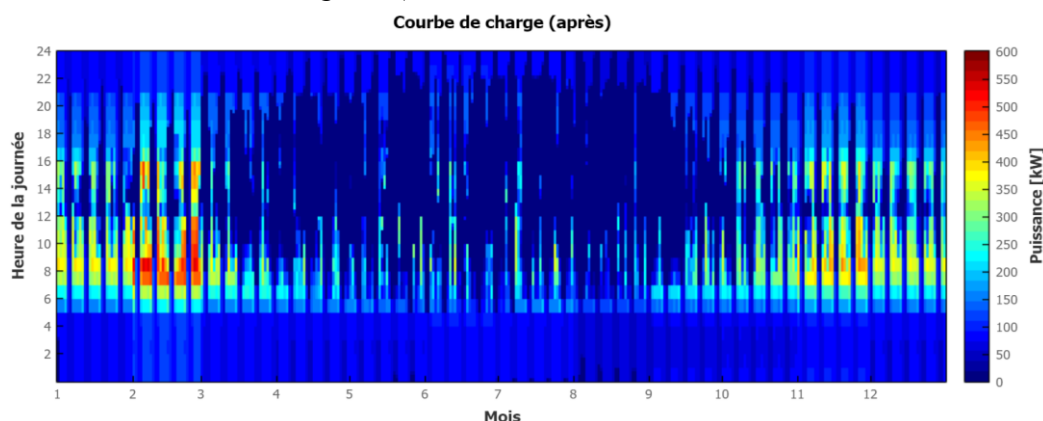


Figure 20 : « Heat map » de la courbe de charge sur une année au pas horaire avec l'installation photovoltaïque

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 MWc » [7] 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]: Christophe FRANCOIS, Les grandes fonctions de la chaîne d'énergie (ellipses, 2 016).

[2]: PHOTOWATT, Systèmes photovoltaïques

[3]: SMA, Systèmes de stockage à batterie ultra flexible pour les applications commerciales et industrielles

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

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

[6]: Annexes de : 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-1mw-c-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

[7]: 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

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