

La halle Pajol comme support distant et instrumenté de TP pour l'enseignement des sciences de l'ingénieur

Culture Sciences
de l'Ingénieur

Michel OURY - Moustafa CHERIGUENE
Ascension VIZINHO-COUNTRY - Arnaud BRUGIER

Édité le
22/03/2021

école
normale
supérieure
paris-saclay

Cette ressource est issue d'une publication du numéro 103 de La Revue 3EI de janvier 2021. Michel Oury est Directeur scientifique d'ANTEC/TPLine, Moustafa Cheriguene est Enseignant de SII au Lycée Louis Jouvét de Taverny, Ascension Vizinho-Country est en charge des relations avec le monde enseignant et du conseil scientifique chez MathWorks et Arnaud Brugier est Enseignant de SII au département GIM de l'IUT de Saint-Denis.

Ces derniers mois nous ont vus plonger devant nos écrans afin de continuer, coûte que coûte, de travailler à distance. Faire ses cours à distance est désormais possible et facilement accessible. Mais quid des manipulations, des activités expérimentales et des travaux pratiques ? Le projet « TP Line » [1], porté par l'association ANTEC¹, propose des activités de TP en temps réel sur des systèmes industriels distants. TPLine est un outil complémentaire des activités du laboratoire et fait travailler les élèves et étudiant·e·s à partir de mesures issues de véritables systèmes en exploitation avec tout ce que cela implique d'interprétation de la réalité et de prise en main.

Au moment où les établissements fermaient leurs portes ou que leur accès physique se restreignait, TP Line était toujours là, vous fournissant le moyen de continuer à enseigner les sciences de l'ingénieur sur des systèmes réels instrumentés dont la halle Pajol, qui accueille la plus grande centrale photovoltaïque urbaine de France, est aujourd'hui le meilleur exemple.

Cette ressource expose le travail de l'équipe pédagogique « halle Pajol » du projet TPLine qui propose des activités de TP en temps réel sur des systèmes industriels distants, fournissant ainsi le moyen de continuer à enseigner les sciences de l'ingénieur sur des systèmes réels instrumentés.

1 – Introduction

Depuis le début des années 2000, ANTEC/TP Line n'a de cesse de faire entrer dans vos laboratoires d'enseignement des systèmes qui, a priori, ne peuvent y entrer.

Grâce à Schneider Electric, qui nous a permis d'accéder à son site de production de Merpins (16) et à son personnel qui, à tous les niveaux, nous a offert son aide et a répondu sans rechigner à nos exigences de pédagogues techniciens et scientifiques (et il y en avait ...), nous avons pu mettre en place des « travaux pratiques » en temps réel et en ligne sur l'étude d'une chaîne de fabrication de contacts électriques de boutons poussoirs. Le Grafcet était encore au programme.

Un peu plus tard, lors d'une assemblée générale de l'UPSTI² à laquelle participait Louis Gallois, alors PDG de la SNCF, nous lui avons présenté notre travail et lui avons soumis l'idée de monter des « travaux pratiques » en temps réel sur le TGV Paris-Marseille. Il nous a ouvert en grand ses

¹ ANTEC : Association des Nouvelles Technologies pour l'Education et sa Communication, <http://antec.biz/>

² UPSTI : Union des Professeurs de Sciences et Techniques Industrielles

laboratoires de recherche et ses équipes sur le terrain, au Triangle des Angles (Avignon), nous ont mis le pied à l'étrier. Ces « travaux pratiques » transmettaient sur le site de TP Line les mesures du Mistral, en temps réel. Avec l'appui du Ministère, de l'Inspection Générale, de l'UPSTI et de nombreux autres partenaires, nous avons pu monter des équipes de professeurs du collège jusqu'aux classes préparatoires scientifiques, qui ont ainsi ajouté de la pédagogie en ligne à la technique.

Avec Schneider-Electric, nous avons ensuite élargi notre action en montant plusieurs activités de « travaux pratiques » en temps réel sur un bras manipulateur destinées à des élèves et des étudiant·e·s du collège supports instrumentés, ainsi que les activités évoquées ci-dessus, sur www.tpline.eu [1].

2 – La ZAC Pajol

La Zone d'Aménagement Concerté (ZAC) Pajol fait partie du quartier de La Chapelle dans le 18ème arrondissement de la capitale. Elle s'étend entre les rues Pajol, du Département, Riquet et la zone de voies ferrées de la Gare de l'Est. C'est sur cette friche SNCF de trois hectares qu'étaient initialement situés le bâtiment des douanes et celui dit des « Messageries ».

À partir de 1994, la Mairie de Paris envisage la restauration de ce quartier de Paris et rachète donc cette zone à RFF (Réseaux Ferrés de France) pour y mettre en place une première ZAC :

« Le secteur « Pajol » est situé dans la partie sud du quartier de la Chapelle, traversé par d'importantes emprises ferroviaires qui s'y sont développées au 19ème siècle. L'ensemble du site était alors occupé par les ateliers de la gare aux marchandises du chemin de fer de Strasbourg. Les constructions d'origine ont progressivement disparu pour permettre l'élargissement du réseau ferré de la gare de l'Est. Aujourd'hui le site est entièrement clôturé. Il subsiste des constructions liées au passé ferroviaire, dont la grande halle dite " des messageries et des douanes ". » (Extrait des délibérations du Conseil de la Ville de Paris siégeant en Conseil Municipal en 2004).

Mais, en 2004, le premier projet de ZAC est abandonné au profit d'un nouveau projet plus ambitieux : *« Dans le cadre du protocole en faveur du logement social signé le 17 mars 1994 entre l'Etat, la Ville et la SNCF, il avait été prévu de réaliser un programme de construction de logements aidés sur ce site alors occupé par la SNCF. Une zone d'aménagement concerté avait alors été créée par délibération du Conseil de Paris en novembre 1994. Toutefois, la réalisation de cette ZAC n'a jamais été engagée et la mise en œuvre du projet d'aménagement défini a été abandonnée. ... Le programme global prévisionnel des constructions et réhabilitations dans la ZAC « Pajol » est d'environ 32 000 m² de surface hors œuvre nette, répartis en équipements et services publics (bibliothèque, équipement sportif, locaux pour les services municipaux), locaux d'enseignement, une auberge de jeunesse et des espaces mutualisés (salle de réunions, de spectacles, d'exposition, espace jeunes, cafétéria), et enfin des locaux d'activités et de bureaux. »*

En 2004, la Ville de Paris confiera la concession d'aménagement de cette zone à la SEMAEST, se reporter aux documents numériques [2,3,4] cités en bibliographie pour plus de détails concernant l'histoire et le développement de ce projet sur cette période. D'autres ressources sont citées et/ou accessibles directement dans les applications pédagogiques en ligne présentées dans cet article. Nous vous conseillons aussi le fond local (CD, DVD, ouvrages) relatif à la ZAC et la halle Pajol et plus généralement au quartier parisien de La Chapelle disponible à la bibliothèque Václav Havel [5].

La Ville de Paris a souhaité faire de ce bâtiment situé au cœur de la ZAC Pajol un démonstrateur en termes d'usages urbains et de solutions techniques à faible impact environnemental (Fig. 1), c'est à dire un projet expérimental dont elle souhaite tirer des enseignements avant reproduction.

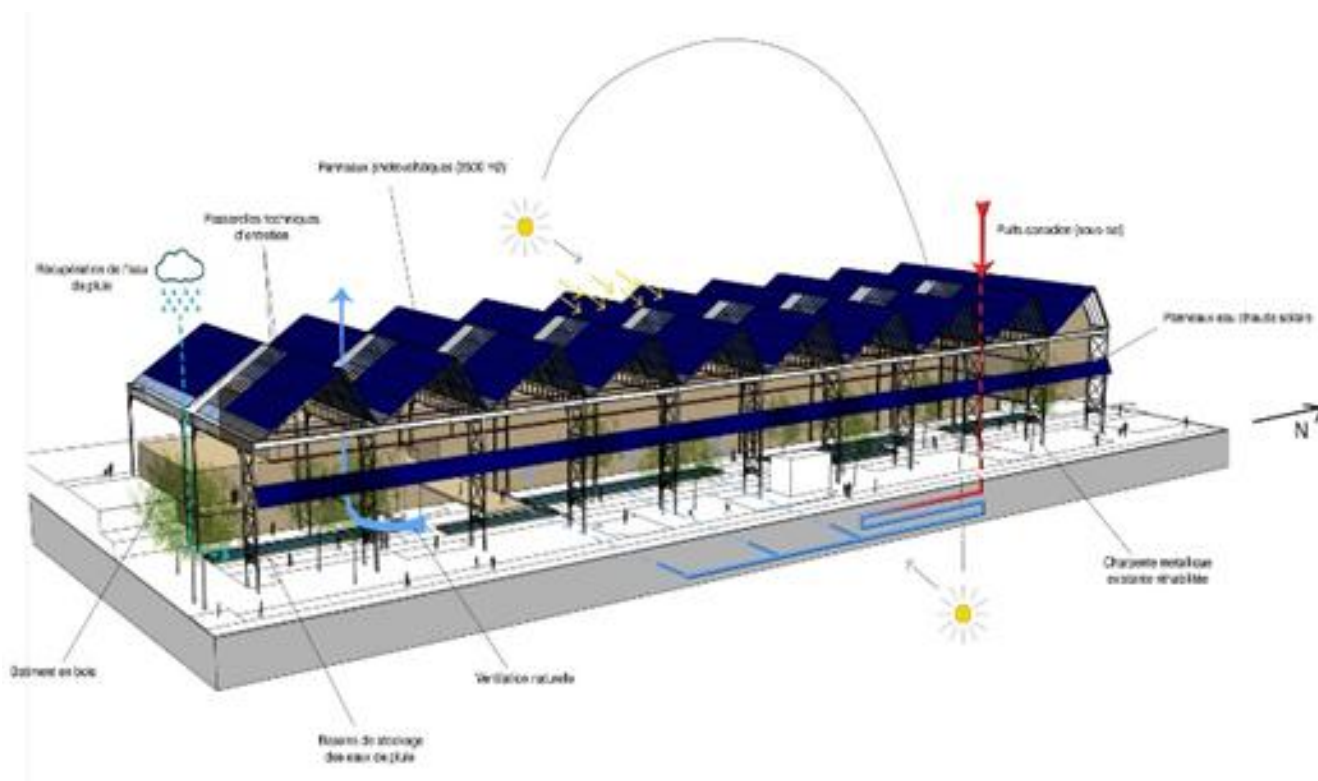


Figure 1 : Vue axonométrique de la halle Pajol depuis le faisceau ferroviaire de la Gare de l'Est

Ainsi, les systèmes de climatisation et de production d'eau chaude sanitaire ont été définis pour utiliser au mieux la diversité de programmes d'occupation de la halle et des principes de sobriété et d'efficacité énergétiques. Les locaux techniques occupent un étage entier et une partie du dernier étage pour 4 niveaux utiles aux programmes du bâtiment.

À noter d'abord que le meilleur besoin étant celui que l'on n'a pas besoin de satisfaire, le bâtiment est très bien isolé (THPE, BBC). Le calcul des besoins bruts a nécessairement été fait avant toute réflexion sur les fournitures d'énergie et les moyens de la sobriété. Via les réseaux, l'énergie est fournie classiquement par le réseau de chauffage urbain (CPCU [6]) et par le réseau public de distribution d'électricité (ENEDIS [7]). CPCU est un réseau de distribution de chaleur par vapeur d'eau, mode choisi en son temps pour transporter la chaleur sur de grandes distances, les centrales étant peu nombreuses et éloignées (509 km de réseau pour 5,2 TWh de chaleur livrés aux clients en moyenne par an) dans un Paris à l'une des plus hautes densités urbaines au monde. Ces centrales sont au fuel, au charbon et aux énergies renouvelables et de récupération (ENR&R). A partir de 50% d'ENR&R, les entreprises comme le CPCU bénéficient de la TVA à taux réduit à 5,5%.

Pour diminuer les consommations sur ces approvisionnements, les concepteurs ont mis en œuvre un puits canadien, le solaire - thermique et photovoltaïque -, la programmation des besoins de chaud et de froid des différents usages à différents horaires ainsi que les récupérations de calories issues des groupes froids (réfrigérateurs, systèmes de climatisation des locaux techniques) et d'énergies fatales via des échangeurs (Fig. 2).

Un puits canadien, ou puits provençal, permet d'aller chercher une température du sol constante, autour de la température moyenne de l'air sur un an, soit 14°C dans le sud de la France et moins

à Paris. On peut ainsi avoir de l'air plus chaud en hiver et plus froid en été que l'air extérieur, quasi gratuitement. Ici un double tuyau a été installé dans la longueur du bâtiment.



Figure 2 : Vue des écrans d'exploitation (GTB CVC ECS ...) et d'une partie de l'installation thermique de la halle (visite technique TP Line du 22/11/18)

Le solaire thermique permet d'obtenir de l'eau chaude sanitaire (ECS). Cette installation de 200m² de capteurs thermiques (Fig. 3) semble avoir souffert d'un décalage entre l'estimation et la réalité des besoins ce qui laisse entrevoir une problématique intéressante à aborder dans le cadre d'une future étude pédagogique.



Figure 3 : Vue de la halle Pajol depuis le jardin d'Eole (à l'est), de l'autre côté des voies de chemin de fer de la Gare de l'Est. Une rangée de panneaux solaires thermiques y est visible, sous la toiture en « sheds ».

La diversité des usages dans le bâtiment permet un foisonnement et donc la diminution des pointes de consommation. En termes de sobriété, par exemple, la salle de conférence et les salles de réunion n'ont pas besoin d'être chauffées ou climatisées hors occupation et cela représente très peu d'heures sur une journée. L'analyse des heures d'occupation et des besoins en kWh associés est donc intéressante.

Les étages de production sont ainsi les suivants :

- les besoins en chaleur (et en froid) sont satisfaits en 3 étages : puits canadien, récupération de chaleur des groupes froids ou le refroidissement des locaux techniques puis mise à niveau par le chauffage urbain ou les groupes froids. La programmation et la

récupération de salle à salle fait le reste. Une VMC double flux assure les échanges thermiques et le renouvellement d'air.

- les besoins en eau chaude sanitaire sont satisfaits en 5 étages : puits canadien, recyclage des calories des eaux usées des douches de l'auberge de jeunesse, récupération de chaleur des groupes froids, thermique solaire et mise à niveau par le chauffage urbain.

Les eaux pluviales qui ruissellent sur la toiture sont traitées en toitures végétalisées et/ou stockées dans des bassins puis réutilisées pour l'arrosage du jardin Rosa Luxembourg, sous la halle. Les rejets à l'égout sont ainsi fortement diminués.

Pour la rénovation de ce bâtiment, le maître d'œuvre était engagé dans un parcours de certification « H.Q.E. /B.B.C. » avec l'objectif d'obtenir le label T.H.P.E (Très Haute Performance Energétique). Cette démarche visait à faire de la halle Pajol une réalisation à énergie positive et donc à renforcer la RT2012. Pour atteindre cet objectif ambitieux, la production d'énergie solaire électrique a été privilégiée et un champ photovoltaïque de 3 200 m², soit 1938 modules pour une puissance cumulée de 465kWc, a ainsi été installé sur l'ensemble des versants de chaque pente de la toiture de l'ancienne messagerie. La production de cette centrale photovoltaïque raccordée au réseau pour revente totale a été initialement estimée aux alentours de 400 MWh/an.

La toiture à redans partiels dits "sheds" s'y prêtait bien : l'orientation du bâtiment nord-sud est un avantage pour implanter des modules en toiture. La structure métallique existante a été débarrassée de ses tuiles et la charpente libérée pour accueillir la centrale photovoltaïque sur les pentes sud et des vitrages sur les pentes nord, apportant un maximum de luminosité au jardin semi-couvert situé en dessous (Fig. 4 et 5).



Figure 4 : Vue de l'entrée de l'auberge de jeunesse Yves Robert (330 lits, bar et restaurant) avec les modules positionnés sur la partie orientée sud d'un « shed » de la charpente conservée (07/01/2020).

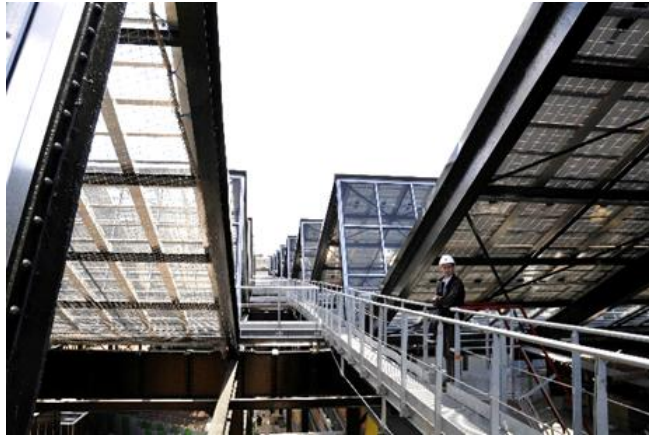


Figure 5 : Visite de la centrale PV avec des étudiant·e·s étrangers (programme d'échange européen IP RELWA organisé par le Dpt GIM de l'IUT de Saint-Denis) lors de la fin de la rénovation de la halle Pajol (avril 2013)

3 – Les mesures sur la centrale PV

L'exploitant de la centrale, Énergie Partagée, a décidé d'avoir recours en 2018 à Épices [8], plateforme web de supervision et gestion d'installations de production d'énergie à partir de ressources renouvelables. Celle-ci permet de centraliser le suivi technique, financier et administratif d'un parc multi-filières. Le service a été créé en 2009 par des producteurs (association Hespul [9]) et s'applique aux filières photovoltaïque, éolienne et hydroélectrique comme outil de monitoring et hypervision. Il est devenu Épices Énergie en 2015 avec l'entrée au capital du fournisseur d'électricité 100% renouvelable Enercoop [10] et est un acteur de l'économie sociale et solidaire (ESS).



Figure 6 : L'outil ÉPICES

La plate-forme Épices (Fig. 6) intègre de nombreuses fonctionnalités dédiées au suivi et à l'exploitation des filières de production d'énergie renouvelable et permet :

- d'acquérir les données,
- d'évaluer la performance de l'installation,
- d'exploiter l'installation,
- de valoriser la production.

Dans le cadre de notre partenariat, Energie Partagée nous a concédé un accès en lecture seule à la plateforme Épices associée à la centrale PV de la halle Pajol nous permettant ainsi d'obtenir historiques et données temps réel. Ainsi, les informations suivantes sont accessibles :

- données détaillées de l'état des constituants et du système (alarmes, défauts, messages...).

- données issues des onduleurs et optimiseurs (DC, AC, grandeurs physiques et évènements),
- intégration des relevés de compteurs et capteurs,
- données d'irradiation mesurées par satellite et par une sonde d'ensoleillement installée en toiture.
- ...

Le tableau de bord (Fig. 7) permet d'observer ces données à des dates différentes ainsi que sur des plages de temps et ainsi de conclure sur les performances réelles en fonction du niveau de température et d'éclairement. C'est ainsi que nous pouvons envisager la création de certaines activités pédagogiques ayant pour objectif de comparer des modèles et estimations avec la production réelle ou de réaliser des études de performance, de fiabilité ou de disponibilité de l'installation.

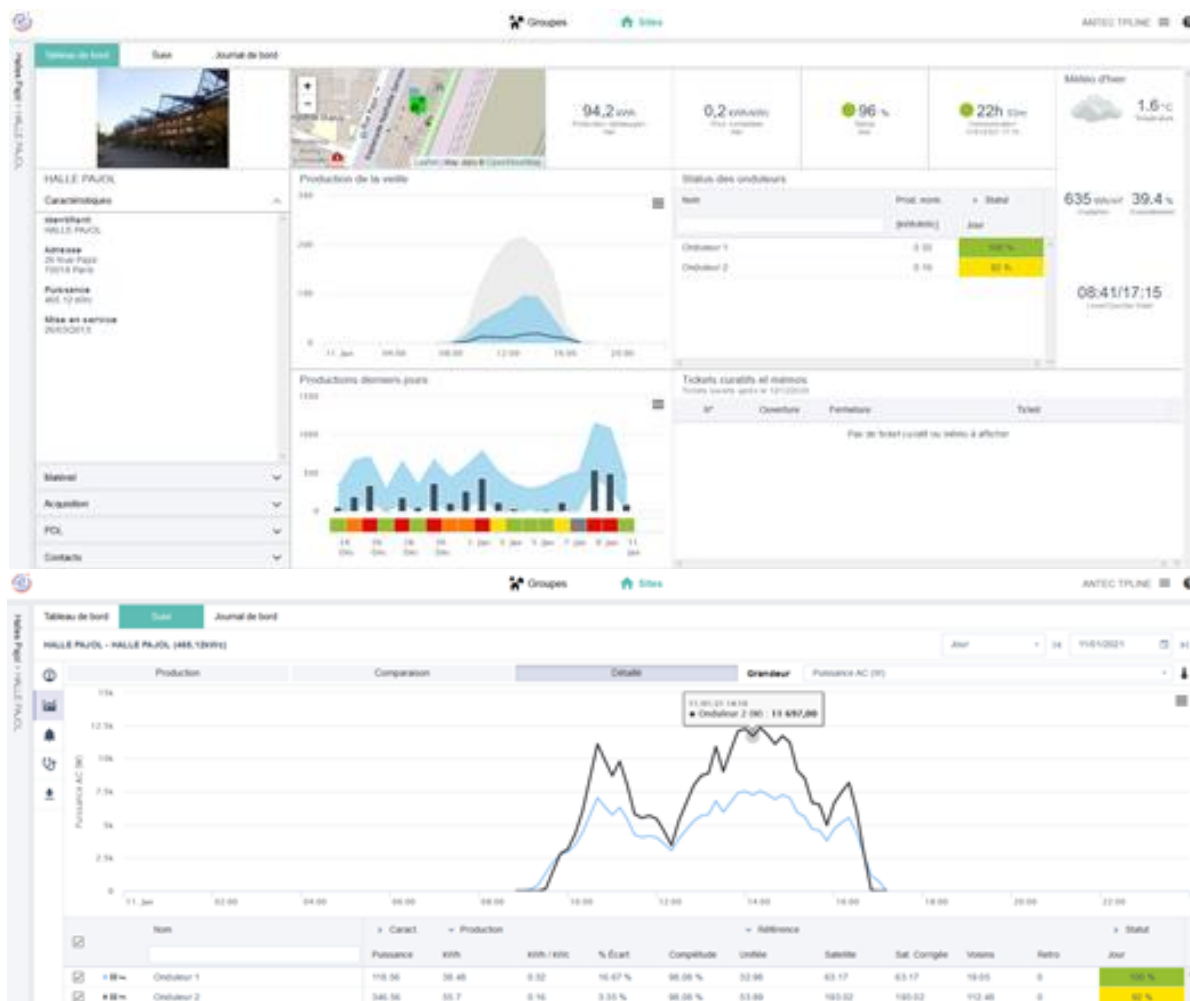


Figure 7 : Exemples d'écrans et de données accessibles sur la centrale PV (tableau de bord journalier et analyse détaillée des puissances par onduleur, Épices)

À des fins de communication, l'outil « kiosque » d'Épices permet de générer une présentation quotidiennement mise à jour de la centrale PV [11].

4 – Aspects pédagogiques

C'est désormais Énergie Partagée [12], structure associative qui fédère, accompagne et finance les projets citoyens de production d'énergie 100% renouvelable en France, qui exploite cette centrale PV. En effet, en 2017, Énergie Partagée est entrée au capital de la société Solarvip qui exploitait pour le compte de la Ville de Paris deux centrales solaires à Paris, sur les toits de la Halle Pajol et de la copropriété Quintessence (Paris 15^{ème}). La société, renommée Tener'IF, a

aussi pour vocation de porter de futurs projets citoyens d'EnR en Île-de-France [13]. Le partenariat qu'ANTEC/TP Line a signé avec la Ville de Paris et Energie Partagée nous donne accès à l'ensemble de la documentation technique relative à la conception et à la réalisation de cette centrale PV via la DOE (Documentation des Ouvrages Exécutés) ainsi qu'à l'ensemble des historiques de production et mesures temps réel via l'accès à la plateforme en ligne EPICES.

4.1 - Première activité mise en place - « La halle Pajol et sa centrale PV »

L'équipe pédagogique de TP Line a donc commencé à travailler sur ce support à des exploitations pédagogiques dédiées au baccalauréat STIDD. Une première activité [14] permet à l'élève de vérifier, à l'aide de modèles et de mesures, si la production annuelle d'énergie électrique est à la hauteur des estimations initiales des concepteurs.

Par ailleurs, l'un des objectifs de la réforme des baccalauréats STI2D est également de doter chaque citoyen d'une culture faisant de lui un acteur éclairé et responsable de l'usage des technologies et des enjeux associés. La dimension « citoyen éclairé » étant particulièrement prégnante dans l'histoire de la ZAC et de la halle Pajol, l'introduction (« La ZAC Pajol : un projet porté par les habitants ») de cette première activité contient donc un volet sur cette histoire et l'implication des citoyens dans ce projet à la fois architectural, sociétal et technologique.

L'activité 1 de la ZAC Pajol propose donc aux élèves et à l'équipe enseignante de cogérer de manière globale un espace d'actions, de réflexions et d'initiatives. Ce projet pédagogique donne du sens à la formation et est conçu dans une logique interdisciplinaire :

- histoire et géographie pour l'introduction du sujet et contexte sociétal,
- mathématiques et physique pour la mise en place des prérequis indispensables à la bonne prise en main de l'activité,
- enseignement de spécialité Ingénierie et développement durable (I2D) en première et enseignement de spécialité Ingénierie, innovation et développement durable (2I2D) en terminale,
- et enfin l'ETLV1, anglais, pour aborder le vocabulaire technique.

L'estimation indispensable du productible en avant-projet est développée dans la partie « La halle Pajol : une centrale photovoltaïque en milieu urbain ». Cette évaluation se fait ici en trois étapes :

1 - Récupération des données du site :

- lieu d'implantation (latitude, longitude)
- orientation (azimut)
- dimension et inclinaison des redans (sheds)
- surface de la toiture photovoltaïque

2 - Estimation de production annuelle :

- première estimation de production
- irradiation solaire annuelle
- facteur de correction

3 - Calcul par application des normes :

- puissance de l'installation
- production annuelle

Ce travail se fait en se plaçant, dans un premier temps, dans la situation des habitant·e·s de l'époque (1994) qui ne disposaient, au mieux, que des anciens plans de cette halle. « *Cette approche STEM se distingue de l'enseignement traditionnel par un environnement d'apprentissage permettant aux étudiants de comprendre comment la méthode scientifique peut s'appliquer à la vie quotidienne et en se concentrant sur la résolution de problèmes réels.* » [15]. Il va donc être nécessaire de virtuellement monter sur ce toit pour en connaître la surface exploitable. À partir de ces résultats, il est demandé aux élèves d'évaluer le nombre de modules à disposer afin de maximiser la puissance installée et ce, par une étude rigoureuse du calepinage des redans et en prenant en compte l'allée de circulation. Il sera ensuite possible de corriger ce premier résultat : surface nécessaire à certains panneaux de verre transparents pour éclairer le jardin, à des panneaux fictifs pour satisfaire des contraintes esthétiques, aux bouches d'aération, etc.

Des rappels mathématiques sur les propriétés des triangles rectangles et des fonctions trigonométriques sinus et cosinus sont disponibles d'un simple clic de souris. Outre le dimensionnement de la surface utile, il est indispensable, pour pouvoir estimer le productible d'une centrale photovoltaïque, de la situer géographiquement avec précision :

- coordonnées géodésiques en DMS (Degrés, Minutes et Secondes),
- azimut, c'est à dire l'orientation en degrés des redans dans le plan nord-sud,
- et l'inclinaison des panneaux par rapport à l'horizontal.

Toutes ces démarches scientifiques et techniques peuvent être faites avec le collègue de géographie.

Au cours de cette première partie de dimensionnement et d'analyse géographique l'élève est appelé à vérifier ses résultats par l'utilisation de pages de questionnement pédagogique utilisant un texte à trous et à réponses multiples. La validité de ses choix dans la liste des réponses possibles est indiquée par la couleur verte (validé) ou rouge (il y a erreur).

La seconde partie de l'activité va maintenant consister à vérifier, soit à l'aide d'outils en ligne, soit en s'appuyant sur les normes spécifiques, la production photovoltaïque que les habitants et la Mairie de Paris étaient en droit d'attendre de la centrale PV.

Dans un premier temps, les élèves déterminent le productible annuel envisageable pour la centrale de la Halle Pajol à l'aide PVGIS (Photovoltaic Geographical Information System, [16]). Cet outil en ligne est le fruit du Centre commun de recherche de la Commission européenne qui se concentre, entre autres, sur l'évaluation et la diffusion des connaissances et des données relatives au rayonnement solaire et aux performances PV.

En renseignant la situation géographique précise de la centrale PV, l'inclinaison et l'azimut des panneaux solaires, leur type (silicium cristallin, ...) et la puissance de crête totale, PVGIS calcule le productible annuel envisageable (Fig. 8). Il tient donc compte de l'ensoleillement et de coefficients pondérateurs. Ainsi, l'élève dispose d'une première estimation de la production attendue, dans des conditions optimales.

2 - Première estimation de la production annuelle envisageable

Les 1938 panneaux solaires utilisés sur le toit de la Halle Pajol sont des panneaux [PV Shüco MPE240 PL60](#), dont la puissance unitaire de crête est de 240 Wc.

Rendons nous sur le site de la Commission Européenne, consultable à cette adresse :

https://re.jrc.ec.europa.eu/pvg_tools/fr/tools.html#PVP

Nous y trouvons un logiciel spécialisé que nous pouvons renseigner à partir de nos études précédentes :

- Centrale localisée par ses coordonnées DD
- Azimut Sud +20°
- Surface des panneaux : 3200 m²
- Inclinaison des 1938 panneaux : 24°



Sur ce site choisissez la langue française, pointez la Halle Pajol sur la carte interactive, choisissez le calcul des performances de la centrale couplée au réseau, renseignez l'angle d'inclinaison des sheds et l'azimut de la Halle Pajol, choisissez des panneaux en silicium cristallin, etc. et tracez vos courbes pour visualiser les résultats.

Figure 8 : Vue d'un écran du TP introduisant PVSyst

L'idée est maintenant de procéder à la même analyse, mais en utilisant les normes nationales et internationales NF EN 15316-4 et EN ISO 15927-4:2005 confirmée en 2015 indiquant comment déterminer l'électricité produite par un système photovoltaïque « *Eel.pv.out* ». L'élève va alors être accompagné pour comprendre ce que représente un à un chaque terme énoncé, puis conduit dans les arcanes des normes et de leurs multiples tableaux pour trouver les valeurs qui correspondent au cas particulier de la centrale de la halle Pajol. C'est au cours de ces tâches que les objectifs de recherche d'informations dans un document technique, d'identification des variables et de calcul vont être visés.

Enfin, une fois que l'élève disposera de ces informations qu'il pourra déjà comparer entre elles (estimations de productible avec PVGIS et à partir des normes), il devra interroger le système réel auquel nous avons accès, via la plateforme de supervision ÉPICES, pour retrouver les valeurs de production réelle annuelle disponibles (2019, 2020) et conclure sur la pertinence des prédéterminations et de ce qu'avait estimé le concepteur lors des études initiales.

La mise en ligne de cette première activité a attiré un grand nombre d'utilisateurs ces derniers mois. Un collègue (Jean-François Colombel, académie de Toulouse) s'est même approprié cette activité pour en analyser l'impact sociétal. Il a donc conçu une exploitation complémentaire basée sur ce que l'on pouvait tirer des premières pages de présentation, de l'historique et des différentes phases de l'implication citoyenne. Nous avons mis en place, sur le site TP Line [17], le travail qu'il a produit avec ses élèves et qui permet de découvrir ce qu'ils en ont compris et assimilé (Fig. 9). Ce projet de reconversion urbaine est en effet un exemple très concret de l'implication citoyenne dans un éco-quartier. Il est possible de suivre, grâce aux nombreux documents écrits et vidéos des habitant·e·s, des architectes, des élu·e·s, comment s'est faite la mise en place de ce qui ne devait être, au départ, qu'un banal ensemble de 630 logements dans Paris. La vidéo « Paris écolo », accessible sur la section « La Halle Pajol - Paris 18^{ème} » de TP Line avec le mot de passe « production », accompagne idéalement cette activité.

Analyse de la sixième page ✓

Le 2 avril 2013, à quelques semaines de l'inauguration de la ZAC Pajol, les acteurs de cette rénovation se sont retrouvés dans un esprit de débat et de fête. Une fête qui saluait dix ans de concertation et d'actions pour faire évoluer et vivre ce nouveau quartier du 18^e arrondissement. Trois tables rondes ont été organisées au théâtre du Grand Parquet par la Coordination Espace Pajol.



Figure 9 : Extrait de l'activité conçue avec J.-F. Colombel, académie de Toulouse

4.2 - Modélisation et simulation multi-physique de la centrale

Une séquence pédagogique plus ambitieuse, écrite également pour la filière STIDD, est également disponible depuis peu.



Ces nouvelles activités s'inscrivent dans le cadre de la réforme du Baccalauréat 2021. Elles visent plusieurs compétences pédagogiques du référentiel STIDD, notamment :

- **CO6.1. EXPLIQUER** des éléments d'une modélisation multi-physique proposée relative au comportement de tout ou partie d'un produit - dans notre cas une installation photovoltaïque de production d'énergie électrique - ,
- **CO6.2. IDENTIFIER et REGLER** des variables et des paramètres internes et externes utiles à une simulation mobilisant une modélisation multi-physique ,
- **CO6.3. ÉVALUER** un écart entre le comportement du réel et les résultats fournis par le modèle en fonction des paramètres proposés, conclure sur la validité du modèle ,
- **CO6.4. CHOISIR** pour une fonction donnée, un modèle de comportement à partir d'observations ou de mesures faites sur le produit ,
- **CO6.5. INTERPRETER** les résultats d'une simulation et conclure sur la performance de la solution .



Figure 10 : Aperçu de l'organisation pédagogique de la séquence proposée (durée estimée de dix heures avec cinq activités interactives en ligne)

Les possibilités de comparaison entre les résultats de simulation obtenus et la puissance relevée en temps réel à un instant donné mais aussi la production de la centrale sur un intervalle de temps choisi afin de discuter des écarts observés est évidemment exploitée ici :

- la première activité (voir plus loin) vise à valider par simulation le modèle multi-physique d'un seul module photovoltaïque,
- la deuxième concerne l'étude du comportement des associations série et parallèle de modules (Fig. 11),

ACTIVITE 2 : Temps estimé dans cette activité 1h30

OBJECTIF : Analyser l'association SERIE et/ou PARRALELE des Panneaux Photovoltaïques SHUCÔ

Question 1 : MONTAGE SERIE, avec l'outil MATLAB Simulink, EXECUTER le modèle « PV Digital Model 2 » afin d'obtenir le montage proposé ci-dessous à l'aide des interrupteurs A et B. Identifier les points caractéristiques (I_m , U_m , P_{max}) à partir de la forme complète des caractéristiques I(V) et P(V).

CONCLURE : L'association de modules photovoltaïques en série montre que la tension aux bornes d'une chaîne PV est = à somme des tension de chaque module de la chaîne et l'intensité de la chaîne est = à l'intensité du module.

Question 2 : MONTAGE PARALLELE, avec l'outil MATLAB Simulink, EXECUTER le modèle « PV Digital Model 3 » afin d'obtenir le montage proposé ci-dessous à l'aide des interrupteurs A et B. Identifier les points caractéristiques (I_m , U_m , P_{max}) à partir de la forme complète des caractéristiques I(V) et P(V).

CONCLURE : L'association de chaînes photovoltaïques en parallèle. Montre que la tension aux bornes d'un groupe PV est = à la tension de la chaîne et l'intensité du groupe PV est = à la somme des Intensités de chaque chaîne photovoltaïque.

Figure 11 : Document préparatoire à la mise en ligne de l'activité 2

- la troisième est dédiée à la modélisation et la simulation de l'ensemble du champ PV (Fig. 12) et à la comparaison avec la production réelle,

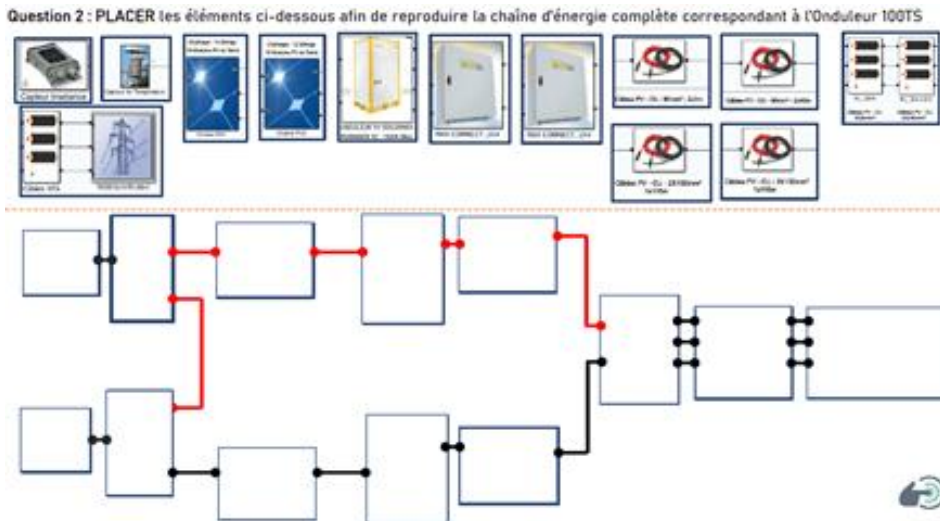


Figure 12 : Document préparatoire à la mise en ligne de l'activité 3 (champ PV associé à l'onduleur 100kW)

- la quatrième est consacrée à la modélisation complète de l'installation et à l'étude de l'injection sur le réseau de l'énergie produite (Fig. 13) avec comparaison à la production réelle,

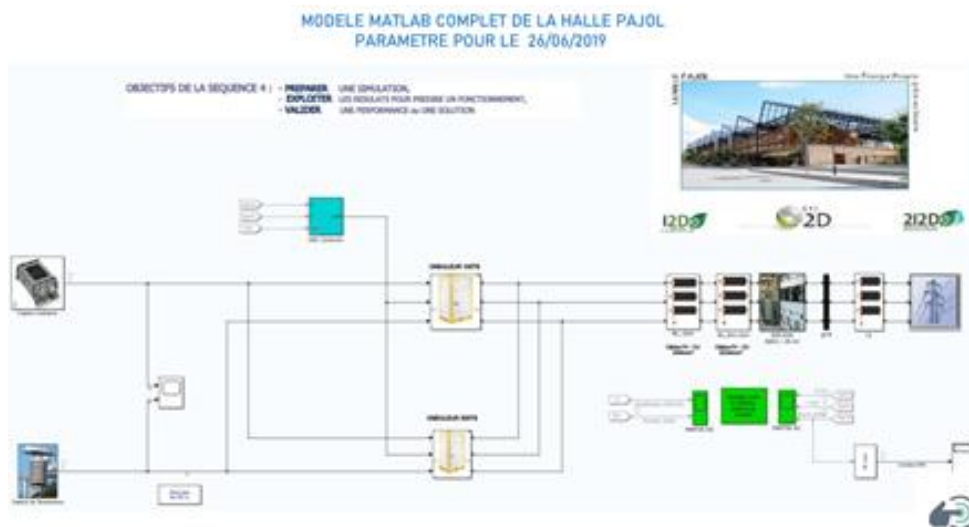


Figure 13 : Document préparatoire à la mise en ligne de l'activité 4 (modélisation Matlab complète)

- en fin de séquence, la dernière activité est entièrement rédigée en anglais afin de sensibiliser les élèves aux langues vivantes et de proposer une activité partagée aux enseignants de S2I et d'Anglais ETLV1 (Enseignement Technologique en Langue Vivante 1).

Ces cinq activités, ainsi que celles de remédiation et d'évaluation, permettront à l'élève d'exploiter finement des résultats de la simulation pour aboutir à l'acquisition de compétences transversales et structurantes du référentiel. Les fichiers de simulation ont été développés à partir du logiciel MATLAB Simulink® de notre partenaire Mathworks®. De nombreux documents ressources sont aussi fournis, pour chaque activité : données essentielles sur l'installation, diagrammes SysML du système centrale PV, architecture électrique simplifiée (Fig. 14), documents constructeurs des principaux constituants,

ARCHITECTURE ELECTRIQUE SIMPLIFIEE DE LA HALLE PAJOL

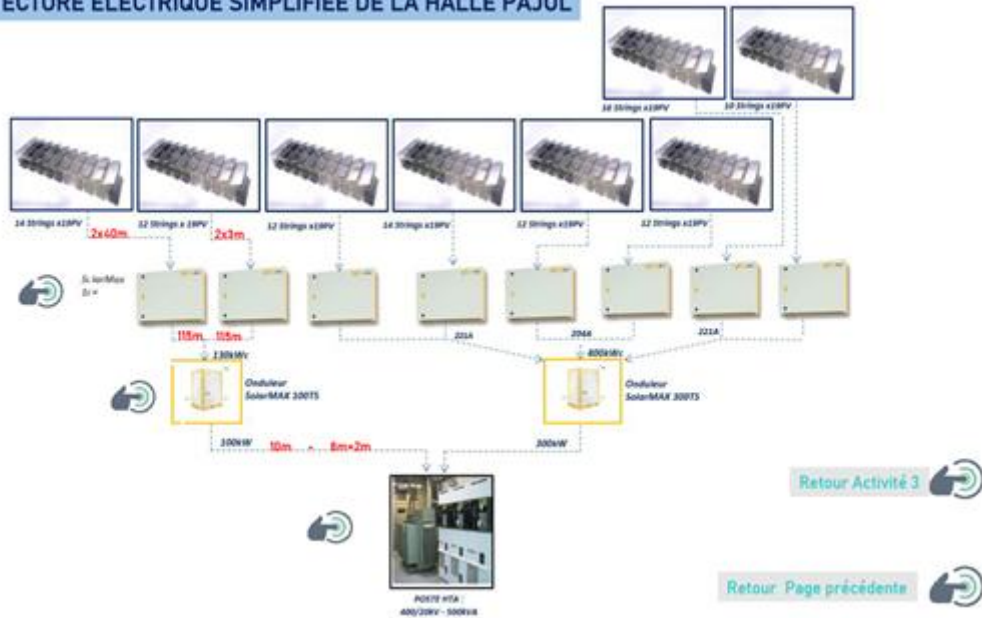


Figure 14 : Architecture simplifiée de la centrale PV

Au début du mois de novembre 2020 nous avons donc mis en ligne la première activité « Panneau Schüco® et son modèle multi-physique » [18]. Les autres vont suivre en ce début d'année 2021. Dans cette première activité il est demandé aux élèves de valider par simulation le modèle d'un seul module photovoltaïque (marque : Schüco®, modèle : MP240 PS09, fabriqué en 2013). Les caractéristiques du constructeur de ce module sont accessibles d'un clic leur permettant donc facilement de relever le courant de court-circuit (I_{sc}), la tension à vide (V_{oc}), la puissance fournie et ce, aux conditions standard normalisées d'essai (STC) (Fig. 15). Les principales grandeurs doivent être définies et reportées dans une page de synthèse interactive et auto-correctrice. Une feuille de contrôle peut également être éditée pour être remise ensuite au professeur.

La Halle PAJOL et sa centrale photovoltaïque

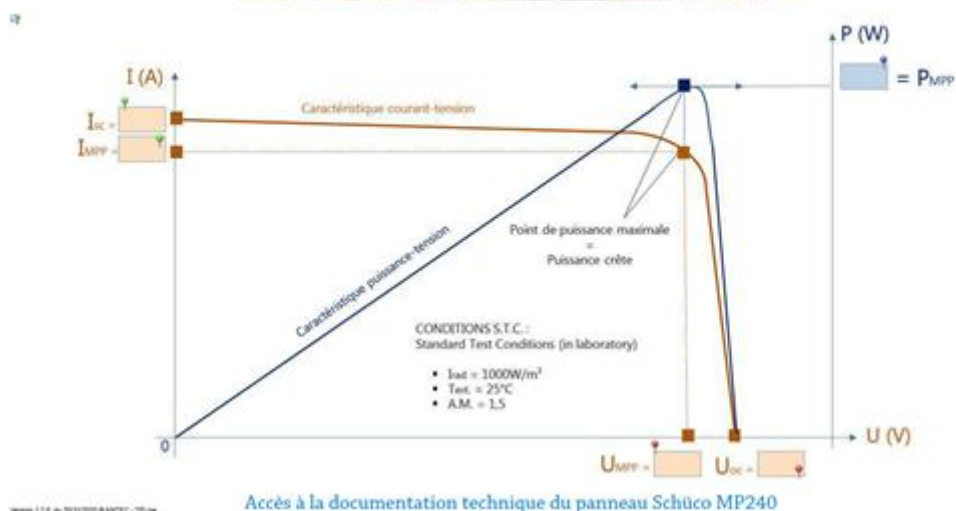


Figure 15 : Écran de report des caractéristiques STC du module étudié

Pour effectuer la simulation du modèle, un fichier MATLAB-Simulink® est fourni à l'élève. La zone montage est illustrée d'un panneau Schüco® dont les caractéristiques sont réglables. L'élève pourra ainsi vérifier ou reporter les grandeurs fournies par le fabricant qu'il vient juste de relever dans sa documentation technique : V_{oc} et I_{sc} . Les autres caractéristiques (facteur de qualité, résistance série du panneau, ...) peuvent être fournies ou modifiées et on se place initialement à

la température ambiante. Il est possible de faire varier le courant appelé en sortie du panneau et, au cours de cette variation, d'envoyer les résultats des calculs, grâce à un élément "Goto", vers la zone de montage n°2 illustrée d'un nouveau panneau d'affichage. L'élève obtient alors dans la zone de mesures des courbes $I=f(V)$ et $P=g(V)$ qu'il peut comparer à celles fournies par le constructeur pour valider ou non le modèle de ce constituant.

Enfin, dans la dernière partie de cette première activité de la séquence, et afin de mieux comprendre les caractéristiques d'un panneau photovoltaïque, l'élève devra utiliser un nouveau modèle multi-physique permettant d'observer l'influence de la température des cellules et de l'éclairement. Deux essais d'éclairement avec quatre températures différentes (soit 8 essais de simulation) sont préconisés (Fig. 16). L'élève dispose des droits pour modifier directement l'éclairement solaire ainsi que la température des cellules, suite à quoi il peut compléter le tableau des mesures obtenues par simulation et remplir un nouveau texte de synthèse à trous et autocorrectif.


15/16

La Halle PAJOL et sa centrale photovoltaïque

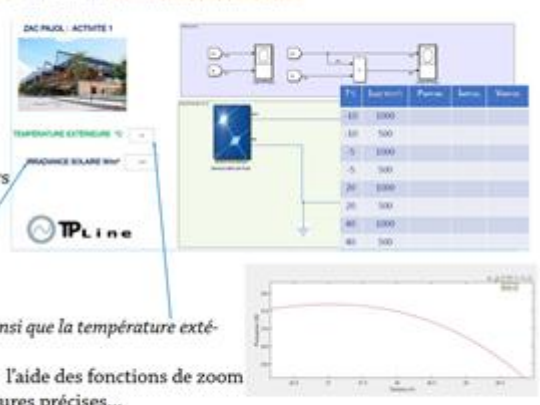
Afin de mieux comprendre les caractéristiques d'un panneau photovoltaïque, nous allons utiliser un nouveau modèle multi-physique Matlab/Simulink, nous permettant d'observer l'influence de la température extérieure et de l'éclairement auxquels il est soumis

Nous allons ici réaliser 8 essais en simulation pour 2 valeurs d'éclairement et 4 valeurs de températures différentes.

La procédure à suivre est la suivante :

- 1 - Exécuter le modèle `PV_Digital_Model_A2.slx`
Vous pouvez modifier directement l'irradiance solaire ainsi que la température extérieure depuis l'image de la simulation.
- 2 - Pour chaque essai, cliquer sur le bouton Run , puis à l'aide des fonctions de zoom disponibles sur chaque image vous pouvez réaliser des mesures précises...
- 3 - Et ainsi compléter systématiquement le tableau de relevés sur le document d'accompagnement.

Vous pouvez aussi utiliser l'application téléchargée, exécutable par le Runtime, si vous ne disposez pas de Matlab/Simulink



Essai	Température	Power	Current	Voltage
1	10	1000		
2	10	500		
3	5	1000		
4	5	500		
5	20	1000		
6	20	500		
7	40	1000		
8	40	500		

Figure 16 : Vue de la page de consignes pour l'étude de l'influence des grandeurs extérieures avec un modèle fourni sous MATLAB-Simulink®

Pour ceux qui possèdent une licence MATLAB-Simulink® les fichiers de simulation sont téléchargeables en ligne sur le site de TP Line, d'un simple clic depuis l'application pédagogique. Depuis peu il est également possible d'utiliser un fichier exécutable sous Windows® (donc de type .exe). Vous pouvez télécharger son programme d'installation ainsi que son mode d'emploi. Ceci a été rendu possible grâce au module de compilation des simulations disponibles avec MATLAB-Simulink® Compiler™ qui permet de partager des simulations en tant qu'exécutables autonomes. Nous avons ainsi créé les exécutables en regroupant le modèle MATLAB-Simulink® compilé et le code Matlab® pour configurer, exécuter et analyser nos simulations. Cet exécutable autonome est donc l'application de simulation complète, utilisant les mêmes graphiques Matlab® et les IU conçus avec Matlab® App Designer. Vous pouvez donc disposer des modules de simulation « .slx » si vous avez une licence dans votre établissement et/ou également utiliser les programmes exécutables pour travailler chez vous. Vos élèves peuvent aussi utiliser ces modules exécutables et ainsi travailler chez eux en distanciel. Toutes nos simulations seront disponibles dans ces deux formats pour toutes les simulations de cette séquence. Nous n'avons pour le moment mis en place que la version pour Windows mais il est également possible de compiler les fichiers « .slx » pour les systèmes d'exploitation Mac ou Linux. Nous étudierons ces possibilités une fois toutes les simulations sous Windows disponibles et mises en place puisque nous savons qu'elles représentent la très grande majorité des cas utilisés dans les lycées. Vous disposez, dans le déroulement des activités, de toutes les explications d'installation, téléchargement et exécution de cet ensemble,

par le jeu de trois fenêtres *pop-up* visualisables par un simple clic depuis vos. Le *runtime* représente 3 Go et il faut prévoir 3,2 Go de plus pour le décompresser. Il vous est même possible, si nos activités de cette séquence ne correspondent pas avec vos habitudes pédagogiques, de n'utiliser que les fichiers de simulation ou le fichier « .exe » pour travailler avec vos élèves et redévelopper votre environnement pédagogique. Ce que nous n'espérons pas malgré tout car ce serait pour nous l'aveu d'un échec : investissement énorme pour un résultat inefficace...

4.3 - Activité orientée exploitation, maintenance (O&M) et optimisation

À la suite de la séquence précédente nous entamons une réflexion pour offrir aux étudiant·e·s des filières post-baccalauréat des domaines de l'énergie (BTS FEE et DUT GTE), de l'électrotechnique (BTS ET et DUT GEII) et de la maintenance (BTS MS et DUT GIM) une activité relative à l'exploitation, la maintenance et l'optimisation du fonctionnement de la centrale PV compatible avec certains objectifs de leurs référentiels respectifs de formation.

La norme UTE C 15-712-1 de Juillet 2013, guide pratique pour les installations électriques BT et plus particulièrement pour les installations photovoltaïques sans stockage et raccordées au réseau public de distribution, expose les principes de la maintenance et les actions techniques minimales à envisager durant le cycle de vie d'une telle installation pour la maintenir ou la rétablir dans un état dans lequel elle peut accomplir la fonction pour laquelle elle a été conçue. Toutes les opérations de maintenance y sont envisagées avec pour priorité d'assurer et de maintenir la sécurité des biens et des personnes. Notons qu'en marge de la maintenance, peuvent être envisagées des opérations visant à pallier l'usure de certains matériels et les adapter à l'évolution des techniques, des normes et règlements en vigueur et également des opérations ayant pour but d'optimiser l'installation existante. Y sont présentés les types de maintenance et périodicité ainsi que les actions de maintenance à réaliser.

Pour la réalisation de ces actions de maintenance sur la centrale PV de la halle Pajol, Energie Partagée a signé un contrat avec l'entreprise EDF ENR [19] jusqu'à la fin 2020. Celle-ci propose effectivement des services pour « garantir la performance des investissements et sécuriser les revenus » assez proche de ce qui est préconisé par la norme et comprenant :

- une visite périodique :

Maintenance électrique (micro-onduleurs, coffrets, TGBT, tableaux) : inspection thermographique, vérification des connexions et serrage des borniers, contrôle des mises à la terre, vérification du fonctionnement des organes de protection, nettoyage des aérations et de l'intérieur des armoires...

Inspection visuelle toiture, chéneaux, descentes EP : détection des défauts d'étanchéité, des déformations ou anomalies de toiture, petit nettoyage si présence de feuilles ou d'éléments obstruant les évacuations.

- un accès dédié au portail internet de suivi de production :

Mise à disposition une plateforme internet afin de suivre la production et la performance de la centrale à tout moment.

Les prestations incluses sont :

- **supervision :**

Contrôle et Gestion quotidienne des alarmes

Support téléphonique centre de contrôle 7j/7

Astreinte superviseurs week-end et jours fériés

Accès client au portail internet

Rapport annuel d'exploitation détaillé

- **maintenance préventive :**

Maintenance électrique (onduleurs, coffrets, TGBT, tableaux)

Inspection visuelle toiture, chéneaux, descentes EP

Rapport de maintenance préventive

- **maintenance corrective :**

Intervention sous 48 h ouvrées

- **engagement :**

Maintien en compétence des équipes techniques

Autres services disponibles :

- disponibilité onduleurs à 97 %, inspection thermographique de type Q19, nettoyage des modules...
- audits techniques & remise en conformité
- interventions correctives sous 4 à 72 heures
- rapport trimestriel d'exploitation détaillé

Pour ce qui est de la supervision, EDF ENR dispose d'un accès « mainteneur » à la plateforme Épices et peut être aussi sollicité à tout moment par ce biais par l'exploitant Energie Partagée ou le propriétaire Ténér'IF. Épices joue ainsi aussi le rôle d'une Gestion de la Maintenance Assistée par Ordinateur (GMAO).

Comme indiqué précédemment, grâce au système de communication (Fig. 17 et 18) et à l'outil Épices qui exploite les informations recueillies, l'ensemble des acteurs peut avoir accès aux données de production cumulées, instantanées et à l'état des constituants (y compris alarmes, défauts, messages...).

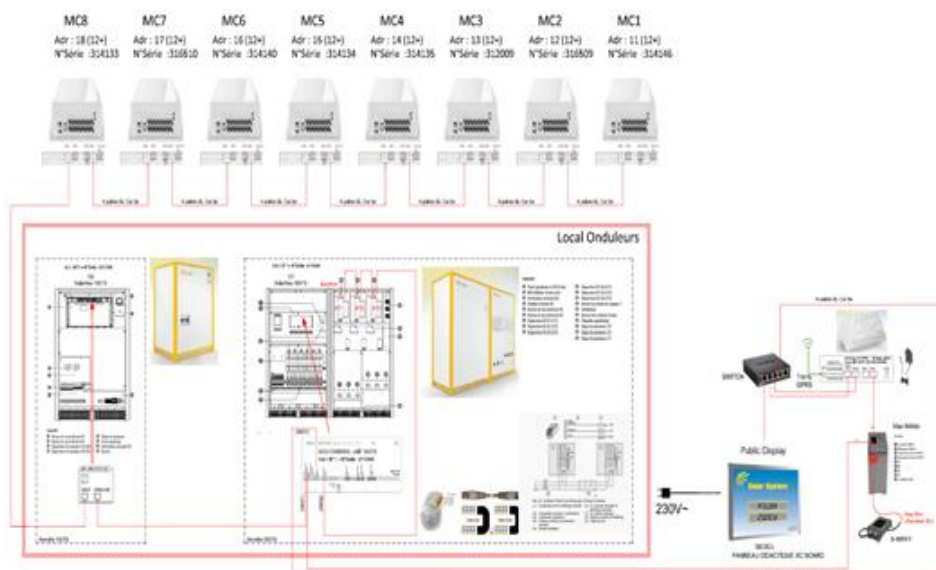


Figure 17 : Schéma unifilaire et de principe de la communication au sein de l'installation PV de la halle Pajol (d'après DOE / Armorgreen)



Figure 18 : Vue du panneau d'affichage didactique et d'information visible de l'esplanade, le 07/01/2020 à 13h, par temps froid et couvert (Pinstantanée=45kW / Production totale cumulée=3011539kWh / CO2 économisé=2108tonnes)

Mais il est également possible de configurer la plateforme de manière à accéder à des informations particulièrement utiles et même certains indicateurs (existants ou à créer) si l'on souhaite mener des études de performance, de fiabilité et de disponibilité.

Ainsi, notre équipe pédagogique, grâce aux discussions engagées avec Energie Partagée qui nous fait profiter de son retour d'expérience sur cette installation, a déjà identifié des problématiques et tâches à confier aux étudiant·e·s sur ces thèmes :

- vérification des valeurs des indicateurs de performance (PR) et de disponibilité (AL) générés par Epices et ce sur une période donnée,
- analyse des conséquences de certains paramètres sur les performances et la disponibilité de l'installation (encrassement des modules, qualité et nature des données, interventions de maintenance, pannes, ...),
- étude et justification de la mise en place d'une garantie de disponibilité,
- conséquence du sous dimensionnement d'un des onduleurs et exploitation d'un modèle issu d'un outil professionnel de modélisation et simulation PV : PVSyst [20], ArcheliosPro [21], ...
- analyse énergétique et discussion sur les données relevées en différents points de la chaîne d'énergie (y compris compteur ENEDIS)
- étude économique des actions de maintenance,
- ...

5 – Conclusion

Ce support très riche est loin d'être encore exploité entièrement et laisse présager de nombreuses autres activités qui pourraient être proposées à nos élèves et étudiant·e·s. Pour cela, nous comptons aussi sur vous, enseignant·e·s, entreprises et collectivités territoriales qui voudrez bien nous rejoindre dans cette aventure.

Nos actions sont soutenues par le Groupe Sciences et Techniques Industrielles de l'Inspection Générale de l'Éducation, du Sport et de la Recherche, par l'UPSTI et par des partenaires grâce auxquels nous pouvons mettre en ligne ces activités pédagogiques à partir de mesures faites sur

des systèmes en temps réel. Ces partenaires industriels et institutionnels nous aident aussi financièrement ou matériellement en nous donnant les moyens de créer ces pages dynamiques.

Cette année l'association ANTEC a été reconnue d'intérêt général. Elle est donc habilitée à recevoir des dons ouvrant droit à la réduction d'impôt et à percevoir le solde de la taxe d'apprentissage des entreprises (hors quota). Mais c'est grâce au soutien financier de vos établissements et entreprises partenaires, que nous faisons vivre TP Line.

Si vous souhaitez obtenir des informations sur la participation à une équipe TP Line de développement pédagogique autour des systèmes M-Rex et halle Pajol, rejoignez TP Line, que vous soyez professeur·e au collège ou au lycée, en pré ou post-bac et ce, quelle que soit votre discipline. Vous participerez à des échanges pédagogiques et techniques avec tous les acteurs de TP Line. Écrivez-nous à pedago@tpline.eu.

Nous vous rappelons que si nos développements pédagogiques ne vous conviennent pas à 100% et que vous souhaitez que nous leur appliquions des modifications, nous sommes toujours disponibles pour lire vos remarques et en tenir compte dans la mesure de nos possibilités. Ce sera ainsi le cas, dès la crise sanitaire terminée, de la mise en place d'une activité entièrement mise au point par les habitant·e·s qui souhaitent pouvoir comprendre et suivre le fonctionnement de la halle et de sa centrale PV pour laquelle ils se sont battus.

6 – Remerciements et participations

Les auteurs remercient vivement toutes les personnes qui nous accompagnent depuis 2018 sur ce projet : les enseignant·e·s et les élèves, bien sûr, qui utilisent TP Line pour leurs retours, questions et remarques, Dorian Vigoureux, enseignant, pour son remarquable travail de correction et de proposition, Erwan Boumard, Directeur et Nicolas Bagé chef de projet de la halle Pajol chez Énergie Partagée, Olivier Ansart, président de l'ASA Paris Nord Est [22] et enfin Bernard Guérin, président d'ANTEC, ainsi que Jean-Michel Vincent, expert développement durable [23], pour leur aide.

Références :

[1]: www.tpline.eu, https://tpline.eu/ressources/plaquette_v2.2.pdf

[2]: https://fr.wikipedia.org/wiki/ZAC_Pajol

[3]: http://www.driea.ile-de-france.developpement-durable.gouv.fr/IMG/pdf/ZAC_Pajol_cle765119.pdf

[4]: <https://hal.archives-ouvertes.fr/hal-01730899>

[5]: <https://www.paris.fr/equipements/bibliotheque-vaclav-havel-8693>

[6]: www.cpcu.fr

[7]: www.enedis.fr

[8]: Épices énergies, <https://www.epices-energie.fr/fr/>

[9]: www.hespul.org/fr/

[10]: www.enercoop.fr

- [11]: <https://v2.epices-energie.fr/kiosque/nmrVQM6N9s3shsGePz1nM782PrM>
- [12]: <https://energie-partagee.org/>
- [13]: <https://energie-partagee.org/projets/tenerif/>
- [14]: <https://www.tpline.eu/ZAC-Pajol/activite1/>
- [15]: Géraldine LAVABRE, IA-IPR STI, présentation issue d'extraits du PNF du 15 janvier 2019.
- [16]: <https://ec.europa.eu/jrc/en/pvgis>
- [17]: <https://www.tpline.eu/ZAC-Pajol/activite1.A/>
- [18]: <https://www.tpline.eu/ZAC-Pajol/activite3/index.php>
- [19]: <https://www.edfenr.com/gamme/maintenance/>
- [20]: www.pvsyst.com/fr/
- [21]: www.archelios.com
- [22]: <https://asa-pne.over-blog.com/tag/pajol/>
- [23]: www.agirlocal.org