

Réalisation d'un plan de transition carbone à l'ECAM basé sur la méthodologie Bilan Carbone® de scope 3.

Ing. M. TERMOTE
Ing. M. WEIDLICH
Dr. M. POCHET
Ir. M. STEISEL
ECAM – Bruxelles

Cet article porte sur le Bilan Carbone® et sur le plan de transition de l'ECAM Brussels School of Engineering. Les méthodes de travail et l'analyse des résultats y sont décrites en détail. Le document développe également deux solutions potentielles du plan de transition : la méthode Slowheat et l'installation photovoltaïque.

Bilan Carbone®, gaz à effet de serre, climat, transition, énergie, Slowheat, photovoltaïque.

This article discusses the Bilan Carbone® and the transition plan of the ECAM Brussels School of Engineering. The working methods and analysis of the results are described in detail. The document also develops two potential solutions of the transition plan: the Slowheat method and the photovoltaic installation.

Bilan Carbone®, greenhouse gases, climate, transition, energy, Slowheat, photovoltaics.

1. Introduction

Ce travail a pour but de proposer des solutions visant à diminuer la participation de l'ECAM Brussels Engineering School (ECAM) au réchauffement climatique global. Ce chapitre pose brièvement le contexte écologique actuels avant de présenter les objectifs et la structure de l'article.

1.1. Contexte

Le changement climatique est une problématique écologique majeure causée par l'activité humaine via d'importantes émissions de gaz à effet de serre (GES). Les conséquences de cette problématique sont, entre autres : une augmentation des événements climatiques extrêmes (vagues de chaleurs, inondations, etc.), la fonte des calottes glaciaires et une hausse du niveau des océans, ainsi qu'une acidification de ceux-ci. Le changement climatique a aussi pour effet de modifier de vastes écosystèmes (désertification, feux de forêts, etc.) entraînant localement la destruction de la biodiversité. De nombreux pays voient leur population contrainte de migrer du fait soit de la montée du niveau des océans, soit des températures extrêmes, soit de l'impossibilité de pratiquer l'agriculture [1]. Cette migration massive entraînera donc nécessairement des troubles géopolitiques majeurs.

Le Gouvernement bruxellois a adopté le plan énergétique visant à diminuer de 40% l'émission de GES pour 2030 en comparaison à 2005. L'objectif final étant de se rapprocher le plus possible de la neutralité carbone d'ici 2050 en réduisant de 95% les émissions de GES.

C'est dans ce cadre que l'ECAM Brussels Engineering School (ECAM) et sa cellule de développement durable ont décidé de réaliser leur plan de transition écologique et de tendre vers la neutralité carbone d'ici 2050. Avant de pouvoir espérer diminuer ces émissions de GES, il faut évaluer leurs importances et leurs origines. Pour ce faire, un Bilan Carbone® (BC®) est établi. Il permet de comptabiliser les émissions de GES sur une année et, grâce à sa division en secteurs, permet également de savoir dans quel domaine l'empreinte carbone est la plus grande. C'est donc sur ces secteurs que des mesures doivent être prises en priorité pour réduire les émissions. Le BC® offre également un moyen de comparer les résultats obtenus d'année en année et d'observer l'impact des mesures écologiques sur le bilan total.

1.2. Objectif et structure

Cet article est issu de deux TFE portant sur l'initiation du processus de transition zéro-carbone de l'ECAM. Cette première phase, entamée à la fin de l'année 2022 consiste à évaluer, de façon relativement précise, l'empreinte carbone de l'école, mais également de proposer un plan pour réduire cet impact.

L'ouvrage se divise en trois grandes parties. La première traite du BC® de l'ECAM et de l'analyse de ses résultats ainsi que des propositions (théoriques) de solutions à implémenter pour neutraliser les émissions de GES. La seconde partie développe la méthode Slowheat comme vecteur de diminution de l'emprunte carbone. La dernière partie présente une installation photovoltaïque (PV), à travers un modèle permettant d'évaluer les possibilités d'autoconsommation énergétique.

2. Bilan Carbone®

Le Bilan Carbone® développé par l'Agence De l'Environnement et de la Maîtrise de l'Energie (ADEME) permet à toute organisation de comptabiliser les émissions de GES inhérentes à l'ensemble de ses activités [2]. Le document final donne accès à un diagnostic global des émissions de GES de l'entité dans le but d'identifier les secteurs les plus émissifs et de prendre des mesures concrètes de réduction.

2.1. Méthode et conventions

Le Bilan Carbone® respecte une série de conventions qu'il est important de rappeler pour mieux apprécier ses résultats.

Indice de CO₂ équivalent

Étant donné leurs différentes caractéristiques, les GES n'ont pas tous le même impact sur le climat. Dans le but de comparer ces différents impacts, le GIEC a créé une unité de mesure, notée CO₂e, permettant d'attribuer à chaque GES une valeur de « potentiel de réchauffement global ». Le potentiel de chaque gaz est comparé à celui du CO₂, ce dernier étant pris comme valeur étalon (potentiel de 1).

Durée et portée de l'étude

La comptabilité carbone est limitée dans le temps. Son application doit définir une durée correspondante à la période d'évaluation des émissions de GES de l'entité. Dans le présent article, la durée d'évaluation est de 1 an.

Le BC® pose également un cadre pour déterminer si oui ou non, une émission de GES peut être imputée à l'organisation étudiée. Trois périmètres opérationnels, appelés « scopes », permettent de définir la portée de l'étude :

- Scope 1 : Émissions directes. Ce scope comprend les émissions dues aux sources contrôlées directement par l'entreprise. Exemples : Combustion d'un combustible, émissions des véhicules appartenant à l'entreprise, émissions dues à un process, etc.

- Scope 2 : Émissions indirectes liées à l'énergie. Ce périmètre englobe les émissions indirectes correspondant à la consommation d'une énergie importée et dont les GES sont émis sur le lieu de production. Exemples : Électricité, chauffage, etc.
- Scope 3 : Autres émissions indirectes. Ici sont reprises toutes les émissions dont les sources se retrouvent hors du périmètre organisationnel, mais qui sont nécessaires l'activité de l'établissement. Exemples : Achat de matières premières, de biens ou de services, déplacements des acteurs de l'organisation, immobilisation des biens et équipements, etc.

Les scopes sont cumulatifs. Le scope 3 englobe les scopes 1 et 2 et empêche toute délocalisation des émissions. C'est ce périmètre qui est choisi pour le présent BC®.

Facteur d'Émission (FE)

L'un des principaux atouts du BC® est de fournir un inventaire de facteurs d'émission. Chacun d'entre eux est un coefficient lié à chaque source d'émission et qui permet de convertir simplement une grandeur quelconque en kg de CO₂e équivalent. Par exemple : le FE du papier est d'environ 0,9 kgCO₂e/kg. Il convient ensuite de multiplier la masse de papier consommée par ce FE et l'on obtient une masse de CO₂e.

La base de données des facteurs d'émission est mise à jour régulièrement au fur et à mesure de l'évolution des connaissances scientifiques disponibles.

Lorsqu'une organisation réalise son BC®, il est nécessaire de définir une unité fonctionnelle qui permet de quantifier l'importance de son activité, et par extension, son propre facteur d'émission. Par exemple : l'unité fonctionnelle d'une voiture est le kilomètre parcouru, ainsi son facteur d'émission est la masse de CO₂e émis par kilomètre parcouru. Le facteur d'émission devient alors l'indicateur de performance de l'entité en termes d'émissions de GES. Il peut être comparé d'un bilan à l'autre.

Catégories d'émission

Différencier les sources d'émission par catégorie permet d'apprécier quels sont les types d'activité ayant le plus de poids dans le bilan final. Les catégories pertinentes dans le cadre du présent BC® sont les suivantes :

- Énergie : émissions dues à l'utilisation directe de combustible (chauffage) et à la consommation d'électricité.

- Hors énergie : émissions dues aux réactions chimiques autres que la combustion, aux fuites de fluides réfrigérants, ainsi qu'aux émanations de méthane, etc.
- Intrants : émissions dues au flux de matière ou de services qui entrent dans l'entité ainsi que les flux informatiques tels que l'envoi de courriels.
- Frets : émissions dues au transport et à la livraison de marchandises effectués pour le compte de l'entité.
- Déplacements : émissions dues aux déplacements des employés et visiteurs. Cette catégorie reprend tous les trajets réalisés dans le cadre de l'activité.
- Déchets directs : émissions dues au traitement de fin de vie des déchets ordinaires, dangereux, solides ou liquides produits par l'entité.
- Immobilisation : émissions de GES liées à l'utilisation de biens pendant la période d'évaluation mais qui n'ont pas été achetés durant celle-ci. Le poste d'immobilisation comptabilise les émissions issues de la fabrication de biens durables (qui font l'objet d'un amortissement comptable) appartenant à l'entité. Il contient en général les bâtiments, véhicules, parc informatique, etc. Le coût carbone de la construction du bâtiment est divisé par sa durée de vie (son amortissement comptable) pour répartir les émissions sur l'entièreté de sa vie.

Il existe d'autres catégories officielles pour les BC® portant sur d'autres types d'activité (notamment la production matérielle) mais celles-ci ne concernent pas l'ECAM.

2.2. Réalisation et limites

Une partie inhérente au bilan carbone est la phase de collecte de toutes les données nécessaires. Celles-ci sont récoltées en relevant les compteurs, en comptabilisant les effectifs, en réalisant des sondages, en émettant des hypothèses, etc. Après la collecte vient l'étape de comptabilisation où les flux collectés (kWh, kg, €, m², pp) sont multipliés par leur facteur d'émission (kg de CO_{2e} par kWh ou par kg, etc.).

Lorsqu'un flux n'est pas disponible, par exemple, le nombre de mails échangés, une hypothèse est posée. L'hypothèse vise un ordre de grandeur réaliste. Une analyse de sensibilité est réalisée en fin de collecte afin de savoir si l'hypothèse peut être conservée sans altérer le résultat final. Si ce n'est pas le cas, il convient d'affiner autant que possible l'approximation.

Chaque élément collecté (chaque flux), et chaque hypothèse, est référencé dans une fiche d'extraction qui contient toutes les informations permettant de reproduire la collecte selon le même mode opératoire lors de bilans ultérieurs.

Après la collecte vient l'étape de comptabilisation où le flux collecté (kWh, kg, €, m², km, h) est multiplié par son facteur d'émission (kg de CO₂e par kWh, ou par kg, etc.).

L'étude d'un BC® n'est pas une fin en soi. De fait, réaliser un BC® sans mettre en place un changement des habitudes est dénué de sens. Le plan de transition prenant des mesures concrètes doit être mis en œuvre en visant les points les plus sensibles en priorité. L'établissement qui fait l'objet du bilan doit s'assurer de la réalisation des actions proposées par le plan de transition, et vérifier l'impact de celles-ci.

Le BC® n'est pas un audit. Le grand nombre d'hypothèses et l'importante variabilité de précision sur les facteurs d'émission rendent le résultat final peu précis. La méthode ne prétend pas produire un calcul exact des émissions de GES au gramme près, mais bien d'avoir un ordre de grandeur et de visualiser l'importance des différentes catégories d'émission.

2.3. Résultats

Résultats totaux

L'empreinte carbone globale de l'ECAM par la méthode du BC® de scope 3 sur 1 an s'élève à 1.175.374 kg CO₂e. Cela correspond en termes d'émission de CO₂ à, en moyenne, 150 tours de la terre en avion, 24 000 trajets en voiture entre Bruxelles et Paris ou encore la consommation annuelle en CO₂ de 47 000 arbres.

Le bilan carbone permet également de visualiser la proportion d'émission dans chaque secteur, comme le montre la Figure 2-1.

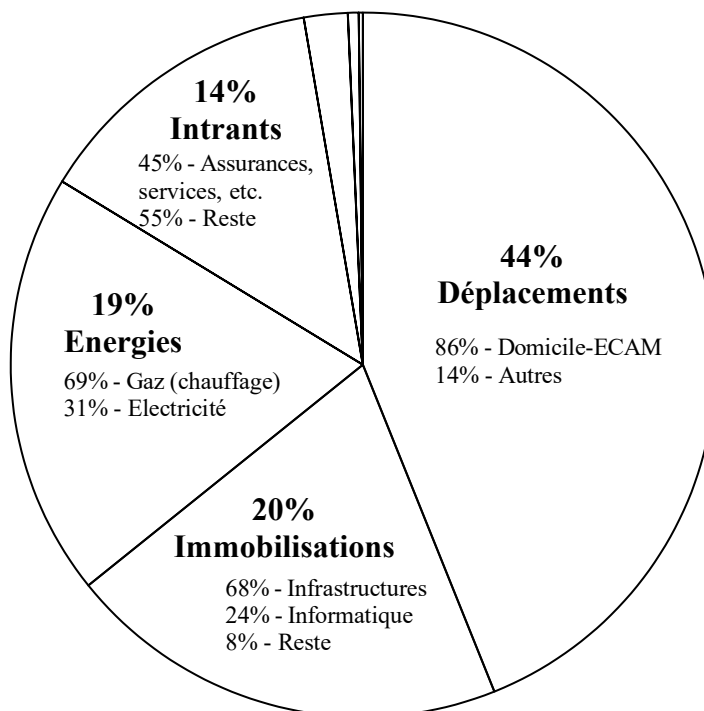


Figure 2-1 : Répartition des émissions annuelles de GES de l'ECAM

Le secteur des déplacements représente 44% des émissions globales. Les trajets domicile-ECAM sont plus importants en termes de kilomètre parcouru et en termes d'émissions que les autres trajets liés à l'activité de l'établissement. Il est important de souligner que pour les trajets domicile-ECAM, 12% des distances sont parcourues en voiture contre 88% pour les autres moyens de transport (bus, train, tram, vélo, etc.). Or les émissions dues à ces trajets en voiture représentent près de 38% du total.

20% des émissions globales de l'ECAM sont dues aux immobilisations, catégorie comprenant les infrastructures, le parc informatique, etc.

Les émissions dues à la consommation d'énergie représentent 19% des émissions totales de l'ECAM. Le chauffage via une chaudière à gaz à condensation représente 69% des émissions de la catégorie « énergie » soit environ 13% du bilan total. Il est bon de noter ici que le bâtiment est récent (PEB B).

Les émissions des intrants représentent 14% des émissions globales de l'ECAM. 45% des émissions de GES des intrants est due aux assurances, services bancaires, conseils et honoraires. Le reste, comprenant machinerie, courriels, services, etc. représentent 55% de cette catégorie.

Facteur d'émission de l'ECAM

L'unité fonctionnelle de l'ECAM est l'étudiant. Le facteur d'émission de l'ECAM est donc compté en kg de CO₂e/étudiant. Le facteur d'émission devient alors l'indicateur de performance de l'école en termes d'émissions de GES. Il permet de comparer l'entité avec d'autres entités équivalentes, mais il permet surtout de comparer l'évolution des émissions de l'entité dans le temps.

L'ECAM accueillant 1243 étudiants, la somme des émissions globales par étudiant est de 946 kg de CO₂e /étudiant par an.

Selon le GIEC, pour atteindre la neutralité carbone, il faudrait que chacun émette 1,2t à 2t de CO₂e par an. Étant donné le fait que chaque étudiant émette déjà pratiquement 1t de CO₂e par an rien qu'avec son activité à l'ECAM, il est nécessaire de prendre des mesures et de trouver des solutions pour diminuer au maximum cette empreinte carbone.

3. Plan de transition

Ce chapitre présente tout ce qui a été réalisé à la suite de l'écriture du Bilan Carbone®.

3.1. Ateliers de réflexion

Une fois les résultats du Bilan Carbone® obtenus, des conférences et des ateliers de réflexion ont été réalisés pour inviter les acteurs de l'établissement à prendre part au projet de transition. Les solutions proposées à ces ateliers de réflexion forment la base du plan de transition de l'ECAM.

Il est toutefois utile de noter que le taux de participation à ces ateliers ne dépasse pas 5% de la population totale de l'ECAM. Ce faible niveau de présence montre qu'il est possible d'améliorer fortement la mobilisation de son public en implémentant d'autres méthodes de communication et de sensibilisation.

3.2. Plan de transition

Le plan de transition proprement dit est une synthèse des actions concrètes à entreprendre pour réduire l'empreinte carbone de l'ECAM. Le document se base sur les résultats des ateliers d'une part mais aussi sur des recherches plus approfondies des rédacteurs du présent article guidés par l'expertise de l'entreprise CO₂ Strategy, spécialisée dans le domaine.

Le plan de transition comporte 11 fiches de projet, présentées par le Tableau 3-1, que l'établissement devrait mettre en application afin d'approcher la neutralité carbone. Les versions complètes des fiches renseignent une liste d'actions à réaliser, un facteur de réussite, un coût, une durée de mise en place, une personne de référence et un indicateur concret de progression de l'action.

Tableau 3-1 : Sommaire du plan de transition

	Titre	Amélioration potentielle du BC®
1	Promotion de la cellule développement durable (DD)	Incertain
2	Favoriser les trajets en train	7,5%
3	Exploitation de l'énergie solaire	2,5%
4	Diminution du chauffage	4%
5	Diminution de l'impact de la consommation d'électricité	1,2%
6	Politique d'achat durable	1,4%
7	Réduction du stockage informatique	0,2%
8	Kots ECAM	3,8%
9	Covoiturage	3,8%
10	Horaires durables (réduction maximale des trajets)	7,5%
11	Économie circulaire	1,4%

Si l'ensemble du plan de transition est correctement mis en pratique, l'ECAM peut s'attendre à voir ses émissions de GES diminuer de près de 25%. Certaines émissions sont malheureusement imposées à l'établissement. En effet, même si tous les acteurs de l'ECAM se déplaçaient exclusivement à vélo, le résultat des émissions de la catégorie « déplacement » ne serait toujours pas nul car certaines étapes de la vie d'un vélo émettent des GES notamment sa construction et sa mise au rebut/recyclage.

La clé de la réussite et de la concrétisation d'un projet de développement durable est le travail de concert de toutes les personnes liées à l'établissement visé. En effet, il se peut qu'injecter de l'argent ou engager un nouvel employé pour prendre en charge un projet soit insuffisant si l'ensemble du public de l'entité reste immobile et insensibilisé par rapport à ce projet.

Les deux chapitres suivants reprennent deux fiches du plan de transition dans le but de les développer plus en détails. Le chapitre 4 concerne la fiche « Diminution du chauffage » et le chapitre 5 reprend en détails la fiche « Exploitation de l'énergie solaire ».

4. Slowheat

L'objectif est de rentrer plus en détail dans la fiche du plan de transition intitulée « diminution du chauffage » en se penchant sur une amélioration technique, à savoir, la pratique SlowHeat et de son application à l'ECAM.

4.1. Contexte

Le système de chauffage actuel se base principalement sur l'augmentation de température de l'air dans le but de créer un climat artificiel dans l'ensemble du bâtiment. La quantité de chaleur gaspillée pour chauffer le réseau d'eau, les murs et le plafond est énorme. De ce fait, le rendement confort/consommation est dérisoire. Notre corps ne représente qu'une infime partie de ce qui est chauffé.

De plus, au fur et à mesure de l'avancée du chauffage central, nous avons perdu la maîtrise de celui-ci. Le carburant principal, le gaz, ainsi que ses impacts et sa provenance sont méconnus du grand public et la technique utilisée pour nous chauffer n'est pas réellement comprise par la majorité des utilisateurs. Souvent, une consigne de température unique est utilisée et de ce fait, l'entièreté du bâtiment est chauffée alors que la chaleur pourrait être limitée à certains endroits stratégiques.

Enfin, en créant cette atmosphère thermique constante et de plus en plus chaude, le chauffage central a apporté une dépendance à la chaleur et a biaisé la sensation de chaleur perçue par les utilisateurs.

Les ressources ne permettant plus à un tel système d'être viable encore longtemps, il est nécessaire de changer les habitudes et de se diriger vers un système plus axé vers la sobriété tout en remettant l'individu ainsi que son ressenti au centre des préoccupations.

4.2. Le confort thermique

Une fois le contexte posé, il est nécessaire d'avoir en tête la notion de confort thermique traditionnel, de connaître les recherches plus récentes et les nouveaux points de vue. Il est également important de rendre à la chaleur son caractère satisfaisant et plaisant ainsi que de connaître les solutions mises en place pour y parvenir.

Le confort thermique traditionnel

Notre représentation du confort thermique induit inévitablement le choix de l'ambiance intérieure. Il se base sur le modèle établi par P.O. Fanger, expert en confort thermique, datant de 1972. Le confort thermique s'appuie sur 6 paramètres :

- Le métabolisme
- Le niveau d'habillement
- La température ambiante
- La température des parois
- L'humidité relative de l'air
- La vitesse de l'air

Le confort thermique adaptatif et l'alliesthésie

La notion de confort adaptatif apparaît dans les années 90 à la suite des recherches de deux experts en confort thermique, Brager et de Dear [3]. Ces recherches mettent en évidence le fait qu'une satisfaction en dehors de ces plages limitées est possible dans la mesure où l'occupant a des moyens de contrôler l'ambiance thermique. Cela rajoute donc le facteur d'adaptabilité de l'occupant au climat intérieur à sa satisfaction.

De ce fait, selon Brager et de Dear, les occupants s'adaptent en interagissant avec les solutions proposées par le bâtiment pour subvenir à leur inconfort. Trois processus d'adaptation ont été décrits dans leur modèle :

- L'adaptation comportementale
- L'adaptation physiologique
- L'adaptation psychologique

L'alliesthésie est un phénomène de perception qui fait la différence entre la satisfaction thermique et la neutralité thermique.

Elle peut se définir par le fait qu'un élément externe ou un stimulus, permettant de faire revenir une sensation vers sa consigne de base, sera perçu comme satisfaisant. À l'inverse, un élément externe ou un stimulus qui éloignerait davantage une sensation de sa consigne de base sera perçu comme insatisfaisant. L'alliesthésie est donc un phénomène poussant à rechercher les stimuli satisfaisants.

Dans le cadre du chauffage, si nous sommes dans un environnement que nous trouvons froid, un apport de chaleur sera perçu comme satisfaisant. Une fois notre corps réchauffé, nous n'aurons plus la satisfaction apportée par cette source de chaleur.

Les stimuli apportent également plus ou moins de satisfaction selon certains critères :

- Plus la chaleur apportée par cette source est vive, plus le sentiment de satisfaction sera grand.
- La satisfaction sera plus grande pour des stimuli localisés que pour des stimuli sur l'ensemble du corps.
- La satisfaction dépend de la zone du corps stimulée

Les « Personal Comfort Systems »

Le but premier de la méthode SlowHeat est la satisfaction de se chauffer. Il n'est pas question de simplement arrêter de chauffer, mais bien de trouver un ensemble de solutions et de pouvoir contrôler la manière de se chauffer.

Les PCS permettent de chauffer uniquement les zones voulues, qu'il s'agisse de zones du bâtiment, mais aussi du corps. De plus, le fait qu'ils ne chauffent pas de manière homogène tout le volume renforce le phénomène d'alliesthésie. Ils permettent également d'avoir le contrôle sur la manière de se chauffer en pouvant les allumer selon les sensations et les besoins, mais aussi en pouvant les déplacer et ajuster la distance avec la zone de chauffe.

La radiation et la conduction sont principalement utilisées comme modes de transferts thermiques. Ils permettent une sensation de chaleur plus vive et plus rapide que lorsque l'on allume le système global de chauffage, renforçant le phénomène d'alliesthésie et le contrôle exercé sur le chauffage. La convection est évitée, car les pertes de chaleur par évaporation sont élevées et le but est de chauffer directement le corps et non plus l'ambiance.

Pour toutes ces raisons, ils ont la capacité d'améliorer grandement la satisfaction des utilisateurs.

D'un point de vue énergétique, leur consommation est infime par rapport à un système de chauffage classique. En effet, leur puissance varie de 50W, pour un tapis de souris chauffant, à 450W, pour un grand panneau radiant.

Les PCS peuvent prendre la forme de meubles, de vêtements, d'accessoires, de panneaux radiants, de fournitures de bureau, etc.

Principe du SlowHeat

La neutralité thermique n'étant plus possible, la méthode SlowHeat se base sur un modèle de confort thermique dynamique et laisse les températures fluctuer plus librement. Elle s'aide de l'usage des chauffages personnels pour faire évoluer le confort adaptatif. Le chauffage central sert alors de dernier recours. Il est alors possible de reprendre le contrôle sur la manière de se chauffer et d'en refaire une

pratique à part entière. En d'autres mots, ne plus se cantonner aux comportements simplistes, mais mettre en commun des solutions variées et prendre toutes les dimensions du problème en compte. Le principe SlowHeat s'axe sur 8 grands thèmes :

- Une libération de la pratique du chauffage
- Une rediscussion des normes de confort dans la société
- Une multiplication des manières de réchauffer les corps
- Une manière empirique de choisir les solutions
- Une consommation d'énergie maîtrisée et réfléchie
- Une consommation basée sur nos besoins et nos ressentis du moment
- Une préférence pour les moyens les moins énergivores
- Une mutualisation de la chaleur

4.3. Application du principe SlowHeat à l'ECAM

Réaliser une expérience à l'ECAM sur la pratique dynamique SlowHeat a pour but de déterminer dans quelle mesure il est possible de garder la satisfaction des acteurs de l'école en diminuant la consommation d'énergie et donc en diminuant le bilan carbone de l'ECAM. Le fait de réaliser une expérience limitée dans le temps permet de voir réellement comment cette pratique peut être mise en place et comment les personnes y réagissent. Le but est également d'aborder une première fois la pratique SlowHeat en ayant en tête une date à laquelle cela s'arrête, permettant de limiter les craintes et donc les insatisfactions. Ensuite, les avis peuvent être écoutés, des améliorations peuvent être réfléchies et, fort de cette expérience, un plan définitif plus qualitatif peut être élaboré et mis en place.

Les différents types de locaux

Tous les locaux du bâtiment n'ont pas les mêmes fonctions, n'accueille pas le même nombre de personnes et ces personnes n'ont pas le même niveau d'activité dans chaque local. De ce fait, les besoins en chaleur ne sont pas les mêmes pour chaque local. Le bâtiment de l'ECAM est donc divisé en différents types de locaux qui seront chauffés de manières différentes :

- Les auditoriums accueillent un grand nombre d'étudiants ayant des sensibilités à la chaleur complètement différentes et étant statiques pendant longtemps. De plus, l'utilisation de PCS est complexe.
- Les classes accueillent des plus petits groupes d'étudiants, sont de moins grands espaces à chauffer et les personnes sont principalement assises et statiques. L'emploi de PCS est plus aisé.

- Les bureaux comprennent les bureaux individuels, les bureaux collectifs et les salles de réunion. Le niveau d'activité est également bas et entraîne une sensation de froid plus rapide, mais l'emploi de PCS est idéal.
- Les laboratoires reprennent uniquement le laboratoire de construction ainsi que celui de mécanique et de soudage. Il s'agit de grands locaux où les étudiants sont la plupart du temps dynamiques et habillés en conséquence.
- Les lieux de passage sont les couloirs, la passerelle, les salles de serveurs ou les toilettes. Ce sont des endroits où les personnes sont dynamiques, ne font que transiter et portent majoritairement leurs vêtements extérieurs.

La démarche étape par étape

L'expérience, représentée par la Figure 4-1, a une durée totale de 47 jours dans le but d'avoir une fin définie pour ne pas décourager les acteurs de l'ECAM et permettre un retour de ceux-ci. De ce fait, des sondages de satisfaction doivent être réalisés à la fin de chaque période et couplés à la température indiquée par les sondes.

Une première étape consiste à communiquer autour de l'expérience qui sera mise en place. Le sens de ce changement, la manière dont il sera appliqué ainsi que les manières de s'y préparer doivent être connues de tous pour être acceptées et que le changement puisse se faire. Les chiffres représentant les gains énergétiques possibles permettent une compréhension de l'impact possible.

Ensuite, l'expérience peut débuter en plaçant des sondes de température dans des endroits servant de témoins.

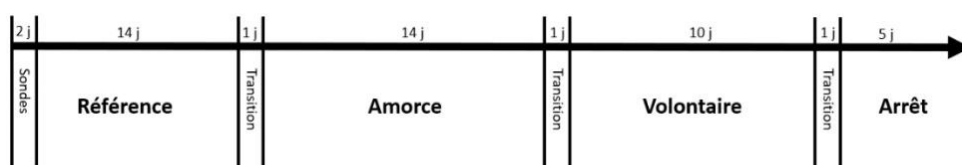


Figure 4-1 : Étapes expérience SlowHeat

La période de référence permet de collecter des données sur une certaine durée au cours de laquelle la manière de chauffer reste identique à l'ordinaire. Cela permet de comparer les données de fonctionnement ordinaire avec celles des autres étapes.

La période d'amorce est une phase durant laquelle la consigne est baissée légèrement et de manière linéaire, les vannes thermostatiques sont réglées plus faiblement que d'habitude. Les lieux de passages ne sont plus chauffés. Elle permet une acclimatation continue et une première diminution de la consommation.

La période volontaire concerne uniquement les bureaux et classes disposant de radiateurs. L'objectif est d'encourager les personnes passant du temps dans ces locaux à essayer de diminuer leur consommation et donc leur température du mieux qu'ils peuvent en utilisant, si besoin, les PCS mis à leur disposition. Le reste des locaux reste à la température atteinte lors de la période d'amorce.

La période d'arrêt indique la fermeture temporaire des vannes thermostatiques du bâtiment. En fonction des retours, une possibilité d'une nouvelle diminution de la consigne pour les auditories est possible. Cependant, étant donné la difficulté d'utilisation des PCS dans ces locaux, garder la température atteinte lors de la période d'amorce pour la période d'arrêt est une bonne idée.

Changement de la manière de chauffer

L'objectif est de chauffer de manière plus dynamique, baisser la consommation d'énergie de l'ECAM tout en faisant attention à la satisfaction de ses acteurs. Il n'est donc pas question de couper complètement le chauffage central. Le chauffage central sert à maintenir une ambiance minimale et à cette ambiance fraîche vient se rajouter l'utilisation des PCS. La manière de chauffer et le niveau de décret pour chaque type de locaux ne seront pas les mêmes.

- Pour les auditories une consigne de 17°C (-2°C) est envisageable.
- Pour les classes, un réglage plus faible des vannes est possible et une descente jusqu'à 17°C (-2°C) est également envisageable. De plus, l'emploi des PCS est plus aisé et plusieurs panneaux radiants peuvent être à la disposition des élèves et des enseignants pour créer un moment de chaleur quand le besoin se fait ressentir.
- Pour les bureaux, le chauffage peut être contrôlé facilement et l'emploi des PCS est aisé, car chaque personne peut les utiliser à son bon vouloir. Une diminution du réglage voire une fermeture complète des vannes est possible et une descente jusqu'à 16°C (-3°C) est envisageable lors de la période d'amorce.
- Pour les laboratoires, il n'y a pas besoin de chauffages d'appoint étant donné l'activité physique plus conséquente et le niveau d'habillement plus élevé. Une descente de la température plus conséquente est également envisageable, 16°C (-3°C) peut être atteint lors de la période d'amorce.
- Pour les lieux de passage, ils peuvent être complètement coupés du chauffage central dès le début.

Simulation de la diminution des émissions de GES possible

Un des objectifs derrière cette pratique est le gain énergétique possible et donc la diminution des émissions de GES de l'ECAM. Une simulation des économies énergétiques sur une période d'un an a été réalisée.

- La période étudiée est la même que celle ayant permis l'établissement du bilan carbone : l'année 2021
- L'isolation de l'ECAM est uniforme sur tout le bâtiment et le coefficient de transfert thermique est fixé à 0,15 W/m²K
- Les calculs sont réalisés pour une température atteinte de 16°C dans les bureaux et les laboratoires et de 17°C dans les classes et auditoriums.
- Les lieux de passage ne peuvent pas être considérés comme ne consommant pas d'énergie, en effet ils font partie de l'espace chauffé et ne sont pas isolés du reste des locaux. Ils seront donc concernés par des pertes énergétiques. Une estimation d'une température de 14°C dans les couloirs due à ces émissions indirectes est appliquée.
- Sachant que le chauffage se coupe lorsque la température extérieure est supérieure à 15°C et qu'il n'est pas allumé la nuit, le temps de chauffage sur une année est estimé à 60 jours de 24h.

De plus, pour cette expérience, il faut ajouter l'utilisation des PCS qui consomment également de l'énergie. Étant donné la facilité de contrôle de ceux-ci et le fait qu'ils ne seront pas toujours utilisés simultanément, une estimation de 30 jours de 24h d'utilisation sur un an est réalisée. Les PCS utilisés sont :

- 100 tapis de souris chauffe main (117W)
- 100 coussins pour siège (60W)
- 50 panneaux radiants (425W)

En prenant en compte cette consommation d'énergie supplémentaire, le bilan est une économie de 30% d'énergie de chauffage. En comparant cette économie énergétique et le bilan carbone, une diminution des émissions de GES et donc de l'impact de l'ECAM sur le réchauffement climatique globale peut être observée.

Pratique de chauffage	Énergie consommée [kWh]	kg CO _{2e}
Chauffage traditionnel	643668	156991
SlowHeat	450023	109761

Tableau 4-1 : Gains écologiques SlowHeat

Comme le montre le Tableau 4-2, une économie de 47,23 tonnes de CO_{2e} est réalisable avec une pratique SlowHeat sur un an. Il s'agit d'une diminution de 20,6% des émissions dues au secteur de l'énergie et une diminution de 4% du bilan carbone total de l'ECAM. À titre de comparaison, il s'agit de l'équivalent en kg de CO_{2e} de 6 tours de la planète en avion.

La diminution de consommation apporte des diminutions d'émission de GES, mais également des économies financières. Diminuer la consommation énergétique de l'ECAM de 30% représente une économie de 8362€¹ sur un an.

En comparant cette économie avec l'investissement pour l'achat des PCS, une estimation du temps de retour sur investissement est réalisable.

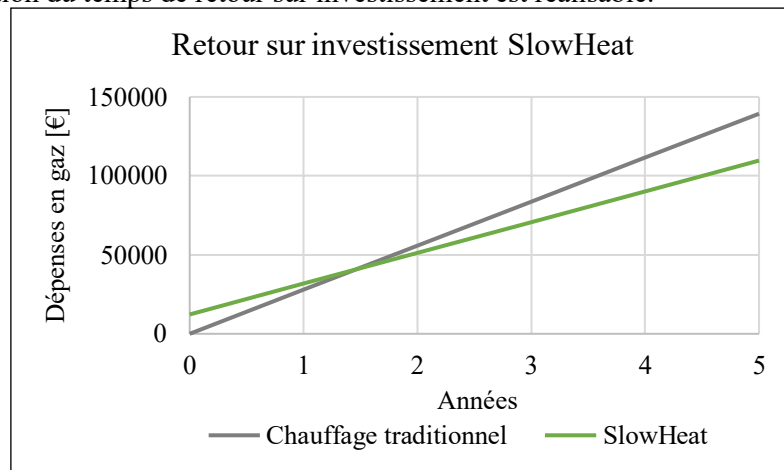


Figure 4-3 : Retour sur investissement SlowHeat

La Figure 4-3 montre que le retour sur investissement financier est atteint après deux hivers de pratique SlowHeat.

¹ Le montant a été calculé par rapport au prix du gaz de chauffage en 2021 (27.873,64€)

5. Installation photovoltaïque et gestion avancée de l'énergie

Ce chapitre présente l'étude d'une installation PV et développe les possibilités de réduction des émissions liées à la catégorie énergie du BC®. Y sont abordés différentes questions relatives à la gestion de l'énergie au sein de l'ECAM, notamment en termes de configuration technique et d'autoconsommation.

5.1. Préparation

Le développement d'un modèle d'installation PV commence par une analyse de l'emplacement de celle-ci. Pour ce faire, il convient d'utiliser le plan d'origine de la toiture. Par ailleurs, une visite du lieu permet d'évaluer les obstacles sur la ligne d'horizon et d'anticiper les zones ombragées.

Sur base du plan de la toiture et comme il est possible de le voir sur la Figure 5-1, une configuration de placement de modules (panneaux) PV est réalisée dans un logiciel d'édition d'image. Les dimensions des modules sont choisies sur base d'un ensemble de modèles disponibles sur le marché. L'espacement choisi pour la configuration prend en compte une petite marge (environ 15 cm) pour les groupes de modules et une marge plus importante (environ 60 cm) pour permettre de circuler entre les groupes. Cette configuration ne tient pas compte de la future division en chaînes (string) qui pourrait influencer le nombre total de modules et s'applique uniquement à couvrir le maximum de surface possible.

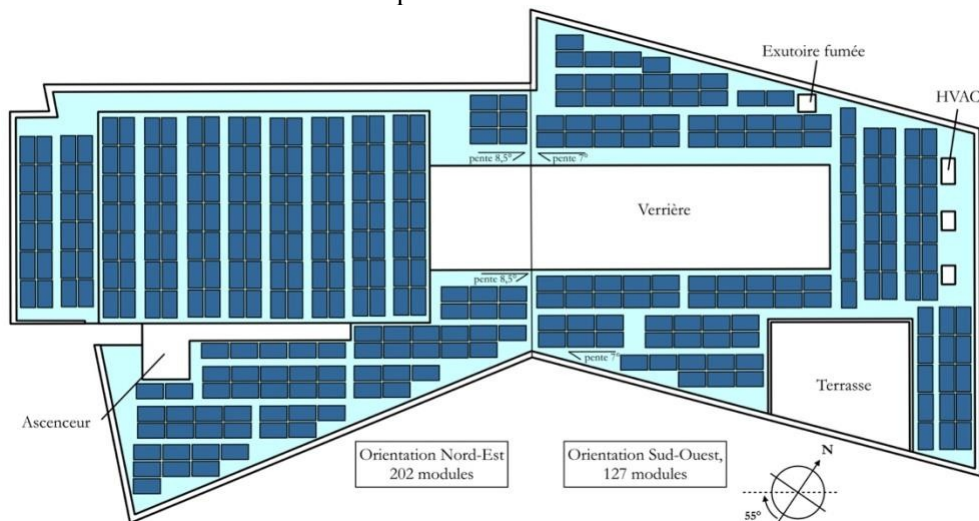


Figure 5-1 : Plan de répartition des modules sur la toiture

La configuration retenue est de 200 modules pour la toiture Nord-Est et 120 pour la toiture Sud-Ouest. Il est bon de noter que la forme particulière de la toiture du

bâtiment est telle que la partie Nord-Est du toit est exposée au Sud-Ouest et inversement.

5.2. Modèle

Le modèle décrit dans ce chapitre permet de comparer avec une certaine précision les tendances de consommation d'énergie de l'ECAM ainsi que les tendances de production qu'elle aurait si elle possédait une installation PV telle que décrite au point précédent. L'idée est de comparer la puissance horaire produite avec celle consommée lors d'une année d'activité de l'établissement. Par « puissances consommées » sont entendus le débit d'énergie électrique et la puissance requise par le moyen de chauffage actuel (gaz) ou éventuellement futur (pompe à chaleur) de l'établissement.

L'objectif du modèle consiste à obtenir différents profils horaires pour les trois catégories suivantes :

- Consommation de gaz en kWh.
- Consommation d'électricité en kWh.
- Production d'électricité PV en kWh.

Concrètement, le système est développé dans Microsoft Excel en raison de la grande quantité de données traitées et de la relative simplicité des fonctions implémentées.

Profil de production électrique

Les dimensions physiques de 1,9x1,2 mètres et la puissance crête de 350 Wp des panneaux sont basées sur un ensemble des modèles relativement équivalents en termes de puissance et dont les datasheets sont disponibles gratuitement sur les sites des fabricants.

Pour calculer la production d'énergie espérée, le logiciel PVGIS est utilisé. PVGIS est un outil disponible gratuitement sur le site de la commission européenne [4] et qui donne accès aux données de production PV en fonction de la localisation, de l'azimut et de la puissance crête d'une installation solaire. Ce système tient compte des relevés météo passés. La production calculée est de 107329 kWh/an.

Profil de consommation électrique

Les données de consommation électriques sont directement obtenues via le relevé de compteur.

Profil de consommation en gaz

Les données disponibles à l'ECAM, en ce qui concerne le gaz, n'indiquent que la consommation totale mensuelle d'énergie. L'obtention d'un profil horaire demande alors de reconstruire des journées de consommation types. Ces journées doivent

représenter l'évolution horaire de la demande en énergie de chauffage normale annuelle.

Les données disponibles sont les suivantes :

- Les consommations de gaz mensuelles pour 2021.
- Les températures horaires extérieures pour 2021 (Bruxelles).
- Les températures mensuelles extérieures moyennes de 1991 à 2020 (Bruxelles).
- Les amplitudes de températures mensuelles extérieures de 1991 à 2020 (Bruxelles).

Il est bon d'insister sur le fait que malgré l'abondance des données liées à 2021, le modèle n'est pas basé sur cette seule année (particulièrement froide par rapport aux moyennes 1991-2020). En effet, l'objectif du modèle est d'anticiper les atouts de l'installation PV sur une année « normale », ceci justifie l'exploitation des deux derniers sets de données cités ci-dessus.

La journée type de consommation doit tenir compte des 3 éléments suivants :

- Le type de journée : journée d'activité ou d'inactivité, et durant quel mois de l'année
- L'inertie thermique du bâtiment : quelle influence une journée de chauffage a sur les journées suivantes
- La température extérieure : la puissance requise doit être d'autant plus élevée que l'air extérieur est froid

Les deux premiers éléments sont assurés par un premier « pré-profil » où la chaudière est soit activée à fond, soit mise en veille. La journée type permet de déterminer combien de temps la chaudière fonctionne à fond. Le temps représente dès lors la grandeur variable et la puissance d'activation est une grandeur constante.

Un second « pré-profil » dresse la consommation de la chaudière si celle-ci réagissait exclusivement et instantanément aux changements de température extérieure. Cette température, variant fortement pour une même période, d'une année à l'autre, seules les données météo moyennes de 1991 à 2020 sont utilisées.

Le profil définitif utilisé pour le modèle est une combinaison des deux. La Figure 5-2 présente un exemple de journée reconstruite par le modèle.

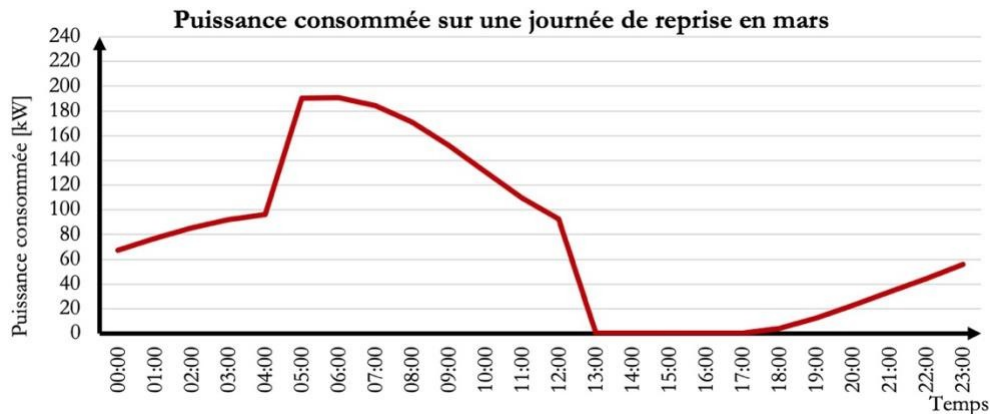


Figure 5-2 : Puissance consommée en mars (choix arbitraire pour l'exemple) en reprise (modèle)

5.3. Résultats

Il a rapidement été découvert que l'ECAM consomme une base d'environ 20 kW électrique à tout moment de l'année, qu'elle soit en activité ou en plein milieu de la nuit pendant les vacances. Cette « charge constante minimale » est définie comme la *Base Load* (BL) à partir d'ici dans le texte. La BL est due à la consommation électrique (mesurée) des serveurs localisés à l'école.

La question de la délocalisation des serveurs de l'ECAM est cruciale dans l'étude de son bilan énergétique, et de son Bilan Carbone® par extension. En effet, certaines entreprises sont spécialisées dans l'hébergement de serveurs et il pourrait être attendu que de telles entreprises proposent un service partiellement, voire complètement neutre en carbone.

Les résultats présentés dans ce chapitre discutent les capacités d'autoconsommation, suivant que la BL est conservée ou délocalisée, ainsi que la gestion des surplus d'électricité produite, notamment pour le chauffage.

Tous les résultats présentés se basent sur une couverture maximale de la toiture. Ce choix de configuration à 320 modules est arbitraire et ne repose sur aucun critère d'optimisation. Il s'agit d'une configuration choisie purement à titre d'exemple pour apprécier le fonctionnement du modèle.

Résultats totaux mensuels

La Figure 5-3 représente les flux d'énergie au cours d'une année. Il donne une vision globale du bilan énergétique de l'ECAM et permet de visualiser les ordres de grandeurs :

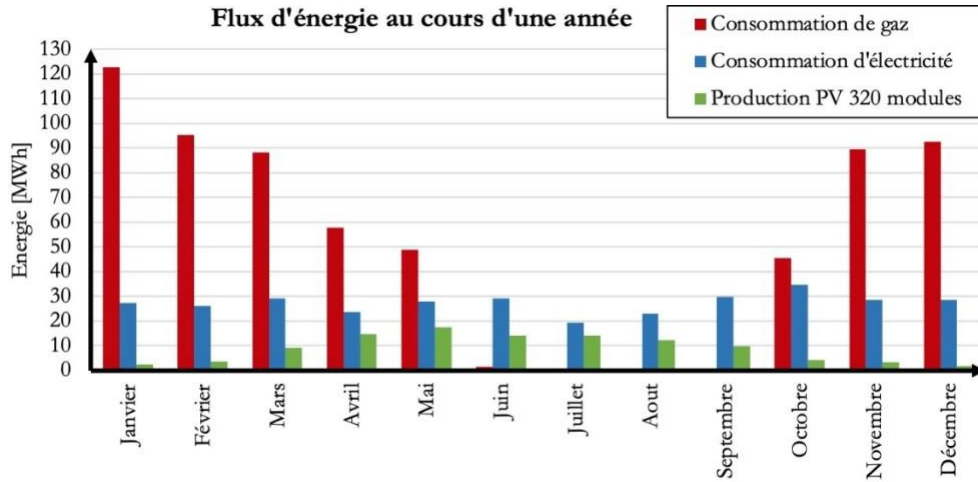


Figure 5-3 : Flux d'énergie au cours d'une année

Observations :

- La consommation de chauffage est nulle en été et suit les tendances météo de façon attendue.
- La consommation d'électricité est minimale en juillet et relativement constante toute l'année.
- Les productions électriques des panneaux solaires sont toujours inférieures (au total de chaque mois) aux consommations du mois correspondant.

La Figure 5-4 présente un exemple de correspondance horaire entre production et consommation électrique au cours d'un mois. La consommation nette est simplement la différence entre la consommation et la production heure par heure. Ces graphes donnent une vue d'ensemble sur les variations d'énergie au cours du mois.

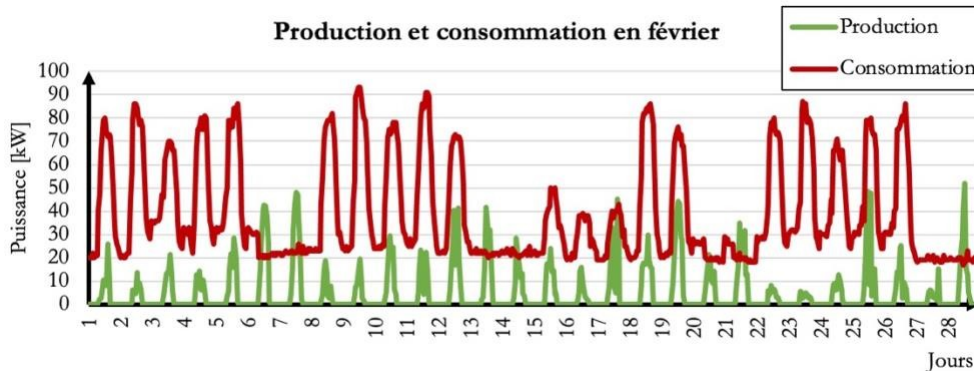


Figure 5-4 : Production et consommation en février

Observations :

- Quantité annuelle d'énergie produite : environ 100 MWh.
- Quantité annuelle d'énergie autoconsommée : environ 80 MWh.
- Quantité annuelle d'énergie produite en surplus : environ 20 MWh.

Interprétations :

- Le taux d'autoconsommation (83%) est élevé par rapport aux moyennes des installations domestiques (environ 30%) est dû au fait que l'ECAM consomme, avec la BL, beaucoup d'électricité par rapport à ce qu'elle pourrait produire avec sa surface de toiture.

La répartition de la production et de la consommation de l'établissement en supposant que la BL soit supprimée réduit le taux d'autoconsommation à environ 50% et augmente donc fortement la quantité de surplus.

Résultats économiques de l'injection sur le réseau (PV seul)

La production permet à l'établissement de récolter des certificats verts qui peuvent alors être vendus, ce qui représente une partie du revenu (subside de l'état). De plus, l'ECAM devient alors producteur d'électricité et la puissance injectée est alors vendue aux fournisseurs d'énergie ce qui représente une seconde partie (la compensation) des revenus générés par le projet.

A Bruxelles, le système de subsides permettrait de récolter 2,4 certificats verts par MWh injectés. Environ 257 certificats peuvent alors être vendus à minimum 65 € pièce pour un total de 16.743 €/an. A cette comptabilité s'ajoute la compensation, soit environ 0,09 €/kWh (contre 0,18 €/kWh pour la vente d'énergie par le même fournisseur). L'ECAM réalise donc une vente de 2.199 € sur sa production annuelle (tarifs injection-compensation 2021).

Le total de l'opération génère un bénéfice annuel de 33.871 € en comptant les économies liées à l'autoconsommation. En revanche, si toute l'électricité produite était autoconsommée, l'école réaliserait un bénéfice total de 36.063 €.

Pour améliorer ce résultat, il peut être pertinent de créer une communauté d'énergie. L'idée est de partager la production avec d'autres bâtiments aux alentours (Clinique Saint-Luc par exemple). Si, au total, la consommation est toujours supérieure à la production, toute électricité produite peut être consommée sur place, au sein d'un même réseau basse tension. L'avantage pour le gestionnaire de réseau est que la communauté d'énergie est vue comme un élément qui consomme moins tout en ne surchargeant pas le réseau en période de pic de production. Le surplus envoyé aux autres bâtiments de la communauté est vendu par l'ECAM moins cher que le coût

de prélèvement sur le réseau, mais plus cher que le prix de vente à l'injection. L'ECAM réalise alors une petite marge.

Résultats sur le BC® de l'injection sur le réseau (PV seul)

Résultats sur le BC® de l'installation PV seule : ce scénario présente une amélioration de 2,1% du BC®. Ce résultat est globalement faible car la part « énergies » du bilan total n'est que de 19,5%, et parce que ce scénario ne s'attaque qu'à la partie « électricité » qui ne représente que 31% des émissions liées à l'énergie.

Si la BL est supprimée, la part injectée, et donc les revenus augmentent. De même pour le BC®. Pour rappel : la BL représente environ 50% de la consommation électrique de l'ECAM. Supprimer simplement cette valeur du BC® induirait déjà une réduction globale de près de 4%.

Résultats lorsque l'énergie excédentaire est utilisée par une PAC et en délocalisant la BL

Afin de questionner plus largement la gestion de l'énergie à l'ECAM, il est bon de discuter également de la méthode de chauffage des locaux. Ce scénario se propose donc d'analyser les résultats énergétiques de l'ECAM lorsque celle-ci passe à un mode de chauffage entièrement assuré par la PAC et donc, complètement électrique.

Est explorée ici la solution la plus complète et efficace pour réduire les émissions de GES. Toutefois, il est important de noter qu'il se base sur les hypothèses suivantes :

- La chaudière au gaz naturel est remplacée par une PAC de coefficient de performance 3 (hypothèse du côté de la sécurité). La PAC tient compte de l'inertie thermique du bâtiment pour chauffer préférentiellement durant les périodes d'ensoleillement.
- Les serveurs sont gérés par une entreprise d'hébergement neutre en carbone.
- Le mixe énergétique belge passe des 220 gCO₂e/kWh actuels à 50 gCO₂e/kWh.

D'autre part, la production est supposée intégralement autoconsommée ce qui n'est pas réaliste. Cette approximation est défendue, en rappelant que même si l'ECAM n'autoconsomme pas tout, l'excès est injecté sur le réseau et consommé ailleurs, ce qui réduit, in fine, les émissions de GES.

L'amélioration du BC® s'élève à 16,9% pour ce scénario. La production électrique couvre alors près d'un tiers de la consommation totale avec un taux d'autoconsommation moyen de 71% (proche de 100% en hiver et de l'ordre de 25% en été). La PAC peut alors contribuer à plus de 40% de l'autoconsommation durant certaines périodes de l'hiver.

La question du stockage

Conserver le surplus d'énergie sur une courte période (environ 12h) permettrait de réduire la facture électrique finale, même si les serveurs sont conservés. Les excès de production en hiver pourraient alors être utilisés le jour suivant. Le stockage saisonnier (en été) basé sur la technologie Li-ion est à proscrire pour des raisons de dimensionnement (capacités énormes) et d'autodécharge (durée de stockage de l'énergie de plusieurs mois). La puissance excédentaire serait alors injectée sur le réseau à la saison chaude, rendant l'installation de stockage inutile à cette période.

Les batteries au lithium représentent un coût carbone et un coût économique très importants. En effet, pour une capacité (choisie arbitrairement pour l'exemple) de 67,2 kWh, l'amélioration globale du Bilan Carbone® s'élève à 1,9%. Pour rappel : la simple délocalisation de la BL chez un fournisseur neutre en carbone réduit le bilan de 4%. Par ailleurs, l'implémentation de batteries au lithium pour une capacité de stockage de 67,2 kWh impliquerait un surcoût d'environ 40.000 € sur le total investi pour le projet photovoltaïque. Sachant que seuls 8000 kWh pourraient être stockés par ans, la recette annuelle de ce dispositif ne serait que d'environ 750 €/an. Cette solution est, de ce fait, un très mauvais investissement (investissement qui peut s'améliorer à mesure que la différence entre le prix d'injection et le prix de prélèvement augmente).

D'autres solutions potentielles de stockage ont été évaluées sans succès. Les technologies actuelles sont encore trop immatures pour une implémentation intéressante par rapport à l'activité de l'établissement.

6. Conclusions

Le Bilan Carbone® de l'ECAM donne pour résultat final une masse de 1175 tonnes de CO₂e émise chaque année, soit un facteur d'émission de 946 kg de CO₂e/étudiant par an.

Les émissions sont principalement dues aux déplacements (44%). Les catégories les plus critiques ensuite sont les immobilisations (20%) et l'énergie consommée (19%). Le poste des intrants (14%) occupe la 4^e place de ce classement, suivi de tous les autres postes (3%) exerçant une faible influence sur le résultat final.

À la suite de la collecte des données ayant permis la réalisation du bilan, l'ensemble de l'ECAM a été sollicitée pour participer volontairement à un atelier de réflexion portant sur le sujet. L'atelier a permis de partager les résultats du Bilan Carbone® d'une part et de mobiliser les personnes présentes dans le but de créer un plan de transition vers un avenir durable pour l'ECAM. Toutefois, il faut souligner le fait

que le taux de présence à cette activité était de **5% environ, ce qui est un total pour le moins préoccupant.**

Le plan de transition réalisé comporte **11** fiches de projet que l'établissement devrait mettre en application pour approcher la neutralité carbone. L'ensemble de ces actions potentielles doivent cependant être étudiées plus rigoureusement à l'occasion, par exemple, de futures TFE dédiés ou par des intervenants internes ou externes. Si l'ensemble du plan de transition est correctement mis en pratique, l'ECAM peut s'attendre à voir ses émissions de GES diminuer jusqu'à près de 25%.

Il est important de rappeler que la mise en œuvre d'un plan de transition dépasse le cadre économique et technique. L'une des principales recommandations de ce travail est la suivante : le changement de la communauté des acteurs de l'ECAM commence par le changement de ses membres. **En d'autres termes, il est crucial que l'école parvienne à mobiliser davantage son public.** Cet objectif peut être atteint par un développement important de la communication et de la sensibilisation.

Il en est de même pour la pratique SlowHeat, une baisse des émissions de GES à hauteur de 47,23 tonnes de CO₂e par an est envisageable, mais la communication est primordiale et son objectif est de faire évoluer les mentalités dans le but de pouvoir instaurer de nouvelles pratiques durables.

Si l'ECAM choisi de s'équiper d'une installation photovoltaïque de taille maximale (320 modules), il est possible d'améliorer le Bilan Carbone® de l'école d'environ 2% et de réaliser des bénéfices économiques importants.

Équiper l'installation d'un système de stockage d'énergie à court terme, de type batteries au lithium, serait un choix économiquement et écologiquement inintéressant et contre-productif.

Un scénario optimal incluant le remplacement de la chaudière par une PAC avec la délocalisation des serveurs et supposant un mixe énergétique belge de 50 gCO₂e/kWh, apporte une amélioration du Bilan Carbone® de près de 17% et constitue une avancée considérable au niveau du bilan énergétique. En effet, bien que ce résultat soit soumis à l'hypothèse très optimiste de l'amélioration du mixe énergétique, il réduit de près de 160 tonnes/an les émissions de CO₂.

Il est bon d'observer que tous ces chiffres restent soumis à d'importantes incertitudes qui peuvent jouer en faveur ou en défaveur du résultat final. Le présent article donne donc avant tout des ordres de grandeur.

Le lecteur aura également gardé en tête que la démarche de transition zéro-carbone doit s'attaquer en priorité aux catégories d'émissions les plus importantes. L'ECAM

doit donc théoriquement d'abord se pencher sur les habitudes de déplacements de son public avant de se questionner sur son bilan énergétique.

7. Sources

- [1] Wikipédia, «Réchauffement climatique,» 2023. [En ligne]. Available : https://fr.wikipedia.org/wiki/R%C3%A9chauffement_climatique.
- [2] ADEME, «Base Carbone,» 2014. Corbeel, E. (2021). Comment intégrer le confort thermique dans la conception. Belgique.
- [3] R. d. D. & G. S. Brager, «The adaptive model of thermal comfort and energy conservation in the built environment, » *International Journal of Biometeorology*, 2001.
- [4] E. Commission, «Photovoltaic Geographical Information System,» 01 03 2022. [En ligne]. Available: https://re.jrc.ec.europa.eu/pvg_tools/fr/. [Accès le 15 02 2023].