

# L'Aéroport Durable

## Etude du cas de Toulouse Blagnac

### *Projet Innovation Challenge*

Viktor Babcan  
IENAC 18 OPS  
ENAC

7 Avenue Edouard Belin, 31400  
Toulouse  
viktor.babcan@alumni.enac.fr

Yannis Bonfils  
IENAC 18 SAT  
ENAC

7 Avenue Edouard Belin, 31400  
Toulouse  
yannis.bonfils@alumni.enac.fr

Guillaume Venesi  
IENAC 19 SAT  
ENAC

7 Avenue Edouard Belin, 31400  
Toulouse  
guillaume.venesi@alumni.enac.fr



## RESUME

Cet article étudie quelques pistes potentielles d'évolution des plateformes aéroportuaires visant à améliorer leur empreinte environnementale. Le cas de l'aéroport de Toulouse-Blagnac en particulier est utilisé. Après un état de l'art des mesures déjà prises ou en voie de développement, cet article propose une modélisation informatique simplifiée, prenant en compte l'état de l'art et se limitant aux flux de personnes et d'énergies de l'aéroport, en faisant des hypothèses fortes pour évaluer leur impact. Les résultats montrent qu'un peu plus de 80 % de l'énergie nécessaire à l'aéroport provient du terminal (système de traitement des bagages inclus).

Cette étude révèle également de fortes consommations d'éléments paraissant anecdotiques au premier abord comme les parkings pour voitures. Les moyens d'accès à la plateforme semblent eux aussi pouvoir être notablement améliorés.

## MOTS-CLEFS

Aéroport, durabilité, nuisance sonore, consommation d'énergie, émissions CO<sub>2</sub> de la construction, émissions CO<sub>2</sub> des transports.

## 1 INTRODUCTION

Aujourd'hui, l'environnement est une préoccupation croissante dans nos sociétés. En effet, de grandes conférences mondiales comme la COP21 ont mis au premier plan un des plus grands défis du siècle : le changement climatique. L'impact grandissant de ce problème inquiète, sans qu'il existe de solution afin de contrer les terribles dynamiques environnementales existantes et émergentes. Cette évolution de la vision du monde a mis en lumière les acteurs responsables de ce changement environnemental, dont le transport aérien fait partie [1].

Les aéroports, en particulier, sont très critiqués, car l'avion est un moyen de transport polluant, bruyant et plutôt réservé aux plus riches. L'impact de l'aviation est donc large et les nuisances induites sont diverses. La **figure 8** (annexe) montre graphiquement ces différents aspects.

Afin de dévoiler le potentiel de ce nouveau type d'aéroport, il est nécessaire dans un premier temps de définir les contraintes que celui-ci devra respecter afin d'être plus durable. De fait, il faut distinguer les problématiques liées à la durabilité. Nous en avons donc établi trois que l'on considérera comme majeures, et qui seront développées plus tard :

1. Tout d'abord une environnementale : L'aéroport devra subvenir de façon propre à ses besoins énergétiques, qu'ils soient électriques, thermiques ou autres.
2. Ensuite une économique : L'aéroport devra être viable économiquement et opérer de façon pérenne.
3. Enfin une sociale : Il faudra un aéroport s'intégrant dans le plan urbain de la commune ou ville à laquelle il appartient et qu'il soit bénéfique à sa population, en limitant les nuisances qu'il engendre.

Afin d'étudier de nouveaux types d'aéroport s'inscrivant dans la transition écologique, nous proposons de modéliser ce que serait un aéroport durable. Cette étude tente de faire l'ébauche d'une telle infrastructure, elle se décompose en trois parties : 1) Un état de l'art et une étude bibliographique de l'existant ; 2) Une mise en place d'une modélisation aéroportuaire et 3) Un développement logiciel.

## 2 ETAT DE L'ART

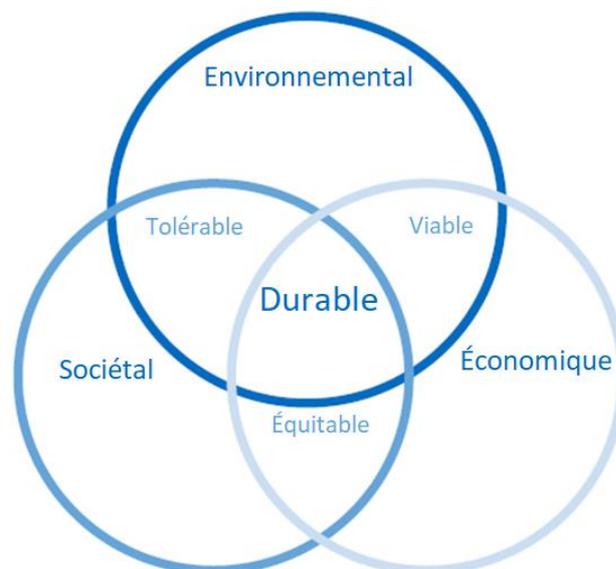
### 2.1 La durabilité

La notion de plate-forme durable est difficile à définir [2], [3]. Ce mot, entré dans la culture populaire et souvent associé à l'écologie, ou même, comme le souligne Kiss dans "Rise and Fall of the Concept Sustainability." [4], simplement comme « un synonyme de tout ce qui est positif », a en fait un sens très large, et sa définition pose problème depuis plus d'une décennie. Il semble en effet que deux visions évoluent en parallèle depuis les années 80 [5] :

1. Une première qui associe la durabilité au lien entre la société humaine et la Nature, comme développé par Robinson dans "Squaring the Circle? Some Thoughts on the Idea of Sustainable Development." [6]
2. Une seconde qui divise et simplifie la notion en considérant qu'est durable ce qui est

environnementalement, économiquement et socialement « viable ».

Dans l'étude présentée, on se focalise sur cette deuxième vision, qui permettra de mieux séparer les différentes problématiques auxquelles font face aujourd'hui les aéroports. Ainsi la durabilité peut se représenter graphiquement comme une intersection de trois aspects représentés sur la **figure 1** [7].



**Figure 1 : Diagramme de Venn définissant la durabilité [7]**

- La durabilité économique se développe positivement si une valeur économique est générée. Les modèles économiques traditionnels sont concentrés sur la performance économique sans nécessairement considérer l'aspect environnemental. Pour des raisons pratiques, l'évaluation de la durabilité économique est souvent menée au niveau de l'entreprise, pour laquelle le "Life Cycle Costing" est un outil possible.
- La durabilité environnementale se développe positivement si moins de dommages sont causés à l'environnement, par exemple si l'impact sur le changement climatique est réduit ou si l'habitat naturel des animaux est mieux protégé. Même si le concept de durabilité est souvent associé simplement à la protection de l'environnement, il est en fait plus complexe et cet aspect environnemental ne représente bien qu'un tiers du problème. Nous avons donc besoin de bien équilibrer tous les trois aspects pour s'assurer d'un fonctionnement correct d'un tel système durable. L'analyse du cycle de vie est un outil couramment utilisé pour évaluer les impacts environnementaux des systèmes de produits. Notre étude portera

principalement sur l'aspect énergétique et sur ses conséquences.

- La durabilité sociétale se développe positivement si de meilleures conditions sociales sont créées pour tous les humains. Elle représente les employés d'une compagnie ainsi que la population en général. Mesurer la durabilité sociale est délicat, parce qu'elle doit également répondre à des questions telles que «Qu'est-ce qui constitue une vie saine ?». Cependant, il y a eu quelques tentatives initiales de création d'outils et d'indicateurs pour la durabilité sociale, l'un d'entre eux étant le Social Life Cycle Assessment [8] [9].

## 2.2 Etude de Cas : l'aéroport Toulouse-Blagnac (ATB)

Étudions d'abord les mesures déjà prise par les aéroports. Le choix est fait de se concentrer sur l'aéroport de Toulouse Blagnac, dont les efforts se retrouvent sur beaucoup de plateformes, et sur lequel cette étude se concentrera dans la suite. Ce choix est justifié par une certaine transparence de l'aéroport rendant un grand nombre de données disponibles, mais aussi par sa proximité géographique ;

### 2.2.1 Les mesures durables prises à ATB

#### 2.2.1.1 Durabilité environnementale.

L'aéroport de Toulouse-Blagnac (ATB) s'est déjà engagé dans de nombreuses solutions afin d'améliorer son site. En effet, celui-ci provoque dans un premier temps les bruits et gênes sonores. Pour ce faire, de 0h00 à 6h00 :

- Interdiction des avions les plus bruyants ;
- Majoration des redevances pour le trafic de nuit
- Mise en œuvre de nouvelles procédures de décollage vers le nord, pour réduire l'impact sonore sur Toulouse et de procédures d'atterrissage en descente continue, en phase d'approche ;
- Poursuite de la politique d'insonorisation ;
- Création et mise en place d'un observatoire « cœur de nuit ».

D'autre part, pour réduire la pollution de l'air les avions bénéficient :

- d'un moteur auxiliaire dit APU (Auxiliary Power Unit) : il assure l'alimentation électrique et l'air climatisé et permet également le démarrage des réacteurs;
- d'un groupe électrogène spécifique : le GPU (Ground Power Unit).

De plus, les eaux pluviales et de ruissellements sont collectées via un réseau d'environ 12km composé :

- de fossés collectant les secteurs enherbés (contour des pistes par exemple);
- de canalisations équipées de regards et de séparateurs d'hydrocarbures, pour les secteurs imperméabilisés (voiries).

Un certain nombre de séparateurs-débourbeurs, permettant de filtrer les hydrocarbures et les huiles, est réparti sur les zones imperméabilisées :

- parkings avions de Blagnac 1,
- parcs de stationnement des véhicules,
- aires de lavage des véhicules.

Pour les eaux souterraines, plusieurs puits de captage des eaux de nappe phréatique sont installés sur l'aéroport. Ils permettent de pomper de l'eau pour plusieurs usages qui ne nécessitent pas une qualité d'eau potable :

- Le fonctionnement des systèmes de climatisation de l'aérogare,
- Certains exercices réalisés par les pompiers ;
- L'arrosage des espaces verts ;
- Le balayage des voiries.

Pour sa gestion contre les déchets, mise en place d'une déchetterie verte pour les entreprises présentes sur la plateforme. La réglementation interdit :

- le brûlage des déchets,
- l'abandon des déchets,
- les rejets dans les réseaux d'assainissement,
- le mélange de certains types de déchets (par exemple les déchets dangereux et non dangereux),
- la mise en décharge de déchets valorisables.

Les exploitants aéroportuaires font aussi de leur mieux pour protéger la faune et la flore en utilisant des méthodes d'effarouchement pour les oiseaux notamment. Pour éviter la prolifération de lapins, ceux-ci sont prélevés et relâchés dans l'Aude. En dernier recours, l'abattage d'espèces est autorisé.

#### 2.2.1.2 Problématique sociétale.

Grâce au Projet Sentinelle, l'aéroport suit et enregistre les trajectoires précises empruntées par les avions, permettant ainsi de vérifier le respect des procédures publiées sur les horaires de vol, et de vérifier qu'un seuil de bruit n'est pas atteint. La réponse aux plaintes des riverains est donc plus aisée, ce qui permet de mieux les protéger contre la pollution sonore engendrée par l'activité. A cela s'ajoute un Plan d'Exposition au Bruit (PEB) ; l'objectif de celui-ci est de permettre le développement des communes avoisinantes sans exposer les nouvelles populations à un niveau de bruit trop élevé. Enfin, ATB propose une aide à l'insonorisation pour les habitants vivant dans le voisinage de l'aéroport [10].

## 2.2.2 de nouveaux projets durables en cours de développement à ATB

L'aéroport de Toulouse-Blagnac est devenu récemment (le 20 juin 2020), après la signature du projet Hyport, le premier site aéroportuaire à développer une station de production et de distribution d'hydrogène vert, qui sera ouverte au personnel et aux particuliers. La station alimentera 4 bus assurant le transport de passagers.



**Figure 2: Station Hydrogène ATB [11].**

Ce projet affirme l'engagement de ATB vers le "zéro émission de carbone" en 2050. Ce projet est important et nécessaire pour rendre les solutions hydrogènes pour les véhicules plus compétitifs aux yeux des usagers, vis à vis des solutions thermiques ou carbonées classiques [11].

L'installation d'une telle station peut aussi représenter un véritable atout pour la vie économique de l'aéroport, puisque celle-ci pourra permettre l'afflux d'un nouveau public qui viendra faire son plein à l'aéroport [12].

## 2.3 Etude de nouvelles technologies durables

### 2.3.1 L'éolien

Pour des raisons de sécurité, il est impossible d'installer de grandes éoliennes à turbines sur le site d'un aéroport. Toutefois de nouveaux modèles sont développés : il s'agit des éoliennes sans pales. Celles-ci présentent de nombreux avantages.

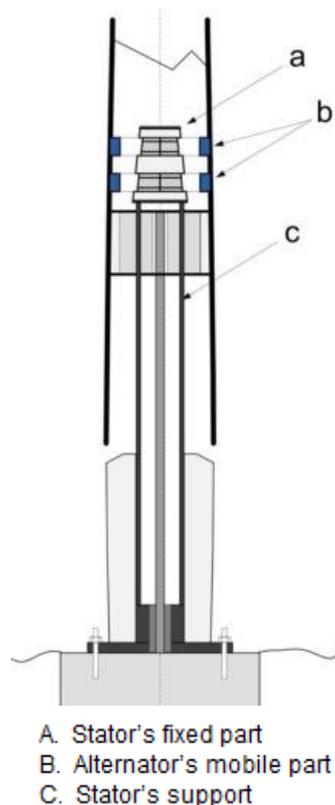
Tout d'abord, leur impact environnemental est réduit par rapport à des éoliennes classiques. Sa conception simple et son poids léger permettent une utilisation très efficace des matières premières, et l'absence de lubrifiants rend inutile la gestion de ces déchets.

D'autre part, celles-ci ne seront pas contraignantes sur un site aéroportuaire si on les imagine frangibles. Leur mouvement, avec un étalonnage et un ancrage approprié, devrait être plus silencieux.

De plus, les interférences de la conception sans lame Vortex sur les signaux radio sont négligeables. Elles sont aussi plus respectueuses de la faune et de la flore et l'impact de cette énergie éolienne sans lame sur la population d'oiseaux devrait ainsi être beaucoup plus faible. La conception de Vortex permet au mouvement oscillatoire sur les turbines sans pales d'être minuscule et moins agressif que les éoliennes traditionnelles. Elles ne perturbent donc pas la

faune et permettent aux oiseaux et aux chauves-souris de les éviter facilement en vol.

Toutefois, il est à noter qu'elles produisent moins d'électricité que les éoliennes classiques, leur rendement étant 30% inférieur à dimension similaire. Cependant, la technologie vise une réduction de plus de 50% sur les coûts de construction et de fonctionnement par rapport à une turbine classique, et de 80% concernant les coûts d'entretien, leur donnant ainsi une rentabilité très attirante pour de nouveaux investisseurs (Figure 10 et Figure 11 voir annexe) [13].



**Figure 3 : Eolienne sans pale [14]**

### 2.3.2 Le photovoltaïque.

Même si la législation ne permet pas pour le moment d'installer des panneaux solaires sur les terrains autour du tarmac et des pistes. Ils peuvent néanmoins être implantés sur les halls et bâtiments principaux de l'aéroport. Ceci va d'ailleurs être appliqué à l'aéroport Roland Garros où l'installation sera posée sur la toiture du hall public de l'aérogare, elle couvrira une surface totale de 2800 m<sup>2</sup>. Cela permettra d'engendrer une puissance globale de 496 kilowatts crête (kWc), couvrant environ 10% des besoins de l'aérogare passagers. Cela permettra aussi d'éviter annuellement environ 600 tonnes de rejets de CO<sub>2</sub>.

Ces résultats très positifs sont toutefois obtenus avec la technologie actuelle de panneaux photovoltaïques, dont le rendement reste assez faible : Entre 7% pour les moins bon et 15% pour les meilleurs. Actuellement, en laboratoire, de nouveaux concepts (comme les multijonctions) visent les

60% de rendement. Certaines technologies prétendent même être capables de transformer l'énergie thermique reçue sur les panneaux la journée en électricité, ceci pendant la nuit [15][16].

### 2.3.3 La géothermie.

C'est une technologie intéressante, car elle exploite une partie inoccupée du site aéroportuaire. En effet, celle-ci va utiliser l'énergie terrestre sous la surface. Elle pourra être utilisée de deux manières différentes :

1. Soit pour chauffer les bâtiments de l'aéroport (hall, salle d'embarquement, bureaux...) en hiver, et les refroidir en été ;
2. Soit pour produire de l'électricité comme l'envisage l'aéroport de Paris Orly afin de réduire son empreinte carbone. L'installation géothermique permettra de produire une puissance de 10MW, réduira la consommation de gaz d'Orly de 4 000 tonnes équivalent pétrole (TEP) et évitera ainsi le rejet d'environ 9 000 tonnes de CO<sub>2</sub> par an [17].

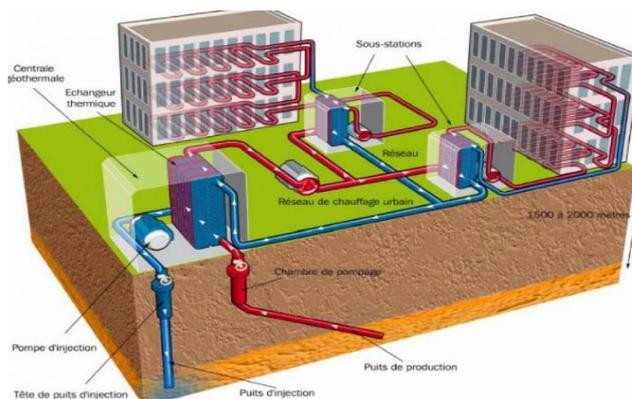


Figure 4 : Pompes géothermiques [17]

2.4.4 La power road. Une autre nouvelle technologie développée par la société Vinci est la Power Road.



Figure 5 : Power road [18]

C'est une route (elle pourrait être assimilée aux différentes pistes d'avions ainsi qu'aux autres infrastructures routières du site) qui produirait une énergie thermique. Cette énergie, provenant des rayonnements solaires serait captée par la route, stockée puis restituée aux bâtiments et infrastructures environnants via un système de pompes à chaleur. Elle peut également être utilisée pour déneiger et déverglacer les voiries et pistes d'aéroports en hiver, réduisant ainsi les interventions de salage. En été, elle permettrait de refroidir les chaussées et de résorber les îlots de chaleur urbains grâce au captage de chaleur en surface. Il est estimé actuellement que pour de grands aéroports cette infrastructure permettrait non seulement d'avoir une énergie propre, mais aussi de faire économiser plus de 10M d'euros rien que pour lutter contre le verglas, 25m<sup>2</sup> de chaussée permettant de capter les besoins énergétiques d'un foyer de 75m<sup>2</sup> [18].

### 2.3.5 L'Hydrogène :

Avec le projet Hyport, ATB va être le premier site aéroportuaire à posséder sa propre installation de production et de distribution d'hydrogène vert. Toutefois, l'aéroport pourrait voir plus grand. En effet l'hydrogène semble représenter un véritable enjeu pour l'avenir, car il apporte de nombreuses solutions complémentaires à la maîtrise des consommations d'énergie et au développement des sources renouvelables : stocker l'électricité, gérer les réseaux énergétiques, se déplacer plus proprement.

La création d'hydrogène se fait à partir d'électricité. Si celle-ci est d'origine renouvelable, l'hydrogène permet alors de stocker, transporter et distribuer cette électricité intermittente. De plus, l'hydrogène permet de recréer un courant électrique si on le recombine avec de l'oxygène pouvant ainsi devenir un carburant pour alimenter les moteurs des engins électriques (bus, voitures, etc) présentes sur le site de l'aéroport ou même de particulier venant chercher leur "carburant".

L'hydrogène permet donc d'envisager pour les années à venir quatre grands axes de développement :

- Dans l'hypothèse d'un futur développant fortement les énergies renouvelables, l'hydrogène apporte des solutions de flexibilité et d'optimisation aux réseaux énergétiques, grâce au Power to Gas. Le Power to Gas va donc permettre de transformer les surplus d'électricité d'origine renouvelable en hydrogène par électrolyse de l'eau : grâce à un simple courant électrique, l'eau est transformée en oxygène ou en hydrogène gazeux. Cet hydrogène produit est utilisé sur place ou injecté dans les réseaux existants (de distribution ou de transport) de gaz naturel en l'état, ou après une étape de méthanation (l'hydrogène associé à du CO<sub>2</sub> est converti en méthane de synthèse). Le Power to Gas permettra donc de stocker plus efficacement les surplus d'électricité des énergies renouvelables et de les mettre au service de différents usages : chauffage, eau chaude, mobilité (véhicules

électriques fonctionnant avec de l'hydrogène, cf projet Hyport) [18]–[20].

Ainsi l'association de l'hydrogène avec le Power to Gas permettra d'apporter plus de stabilité pour les énergies renouvelables. Effectivement, pour les sources d'énergies renouvelables dont la production ne fonctionne que par intermittence, celle-ci est de fait difficilement prévisible à cause des conditions climatiques qui ne sont pas toujours les mêmes.

- L'hydrogène donne également de nouvelles opportunités pour l'autoconsommation d'énergies locales à l'échelle d'un bâtiment, d'un îlot ou d'un village, tout particulièrement pour les zones non connectées au réseau électrique ;
- Le développement des véhicules électriques hydrogène vient diversifier l'offre d'électromobilité, répondant aux besoins de la mobilité professionnelle
- Les nouvelles technologies permettent enfin de réduire les impacts liés à l'emploi actuel d'hydrogène produit à l'aide d'énergie fossile dans l'industrie [21] [22].

### 2.3.6 Bilan

L'aéroport, avec l'apport de ces nouvelles technologies comme la géothermie, la power road, et même des stations d'hydrogène, pourrait devenir une source énergétique, pour l'écosystème et le voisinage cela permettrait non seulement d'aider à la durabilité environnementale, mais aussi économique et sociétale. On peut en effet imaginer l'aéroport comme ayant une activité encore plus diversifiée, et capable de subvenir aux besoins d'énergie des riverains, en plus de leur offrir une importante surface commerciale. Ainsi l'aéroport s'inscrirait de manière durable dans son environnement et serait essentiel au développement de son voisinage, sa région.

## 3 MODELISATION DES FLUX DE PERSONNES ET D'ÉNERGIE SUR L'AÉROPORT DE TOULOUSE-BLAGNAC

### 3.1 Idée générale

La complexité, et surtout la multiplicité des enjeux liés à l'aéroport et à son environnement, rend nécessaire une simplification et une approche « au cas par cas », où un nombre limité d'acteurs et un certain nombre d'hypothèses simplificatrices permettent de cibler quelques axes d'amélioration de l'aéroport, et une quantification des progrès possibles.

Cette étude propose donc une modélisation des flux de personnes et d'énergie sur l'aéroport de Toulouse-Blagnac (code OACI : LFBO). Des hypothèses fortes, détaillées plus

tard, ont été faites lors de son développement, et il convient de rappeler que les débats houleux sur les énergies renouvelables au sein de la communauté scientifique, et même de l'opinion publique, peuvent amener à les discréditer. Des efforts ont donc été faits pour intégrer un maximum d'options à la modélisation, afin que des hypothèses différentes puissent être faites facilement et fournir d'autres résultats.

Par exemple : nous avons choisi de quantifier l'impact environnemental de l'aéroport en mesurant sa surface et ses émissions en équivalent CO<sub>2</sub> (eqCO<sub>2</sub>), qui quantifie la capacité d'un gaz à retenir le rayonnement solaire. Il convient donc, pour évaluer ces émissions, d'évaluer les besoins énergétiques à LFBO et d'étudier les solutions possibles pour y subvenir. Le rapport 2014 du GIEC [bibliographie] fournit en détail une évaluation des émissions liées à différents types de centrales, présentée sur la Figure 14 disponible dans l'annexe.

La figure 14 présente le nucléaire comme un des plus faibles émetteurs de CO<sub>2</sub>, en émettant presque 4 fois moins d'eqCO<sub>2</sub>/kWh que le photovoltaïque, largement considéré comme une énergie « verte » dans l'opinion publique. La précédente hypothèse simplificatrice pose donc un problème et est sujette à débat. Pour pallier ceci, notre étude rend possible l'utilisation de nombreuses centrales, à choisir par l'utilisateur, chacune associée à un coefficient lié à son impact environnemental. Le choix a été fait, pour la suite, de n'utiliser que de l'énergie photovoltaïque et éolienne sans pale, que nous imaginons frangibles pour répondre aux besoins de sécurité du secteur aéronautique. Ce choix est justifié par le besoin en surface de l'aéroport souvent, surface souvent non utilisée en grande partie, ce qui s'accorde avec les besoins de ces technologies.

Passons maintenant à la modélisation proprement dite ; celle-ci se base sur un schéma très répandu de l'aéroport figure 6 (aussi disponible dans l'annexe) :

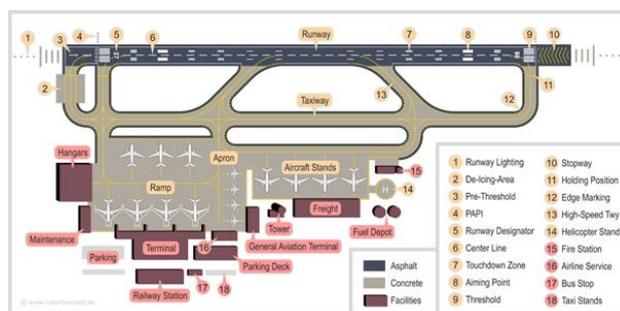


Figure 6 : Schéma des acteurs de l'aéroport, supposés tous consommateurs d'énergie [23].

Un grand nombre d'acteurs est identifié, dont les besoins sont divers. Le terminal par exemple, requiert une alimentation en électricité pour l'éclairage ou le système d'enregistrement des bagages, mais aussi un système de génération d'eau chaude et froide. On distingue aussi plusieurs secteurs d'activités regroupés que l'on regroupe

dans 3 catégories : les moyens d'accès, l'Aire de manœuvre et l'Aire de trafic.

Bien que le modèle se concentre sur les aspects énergétiques, soulignons que l'aspect sociétal et le bruit apparaîtront dans le modèle grâce à la présence d'un paramètre simple : la distance Ville-Aéroport. L'aspect économique quant-à-lui, est simplement abordé par la diversification des activités de l'aéroport, qui pourrait devenir une station fournissant de l'énergie aux riverains alentour.

### 3.2 Modèle conceptuel des entités énergétiques d'un aéroport

La modélisation précédente est maintenant développée sous format UML sur la [figure 15](#) disponible en annexe. Les précédentes catégories sont intégrées, auxquelles on ajoute les moyens de production d'énergie. Chaque acteur se voit affecté de coefficients, facilement modifiables, liés à sa consommation d'énergie, sa capacité de production, ou ses rejets en CO<sub>2</sub>. Les figures 16 – 19 viennent de ce même diagramme mais chaque catégorie est isolée.

Le choix est fait de modéliser les moyens d'accès comme montré sur la [figure 18](#). L'étude choisit de modéliser le flux des passagers empruntant chaque moyen d'accès par un coefficient d'attractivité entre 0 et 1. Le besoin énergétique de chaque composant correspond uniquement au besoin de l'infrastructure, c'est-à-dire au besoin de l'éclairage d'un parking par exemple. En revanche, les émissions sont bien associées au trajet des moyens de transports (bus, train, taxi ou voiture de particuliers). A noter que l'élément « parking voitures » est composé de tous les parkings, du dépose minute au parking dit « longue durée », et que les émissions associées sont différenciées, puisque les passagers se faisant déposer nécessitent un trajet deux fois plus long (1 aller-retour de la voiture correspond à 1 aller pour le passager).

Remarquons que toutes les centrales présentées dans la [figure 19](#) ne fournissent pas le même type d'énergie. Pour simplifier la modélisation, il a finalement été décidé que tous les besoins de l'aéroport s'exprimaient en besoin électrique, c'est-à-dire que l'étude assimile tous les types d'énergies et les considère identiques. Cette hypothèse est forte, car si on imagine un aéroport dont les besoins sont de 80W d'électricité et de 20W de chaleur (fournie par des chaudières, ou des moyens de géothermie), nous considérerons que l'aéroport consomme en fait 100W d'électricité. Lors de notre étude, nous avons évalué la part de l'énergie thermique à 15% du besoin total en énergie.

Les différents coefficients de consommation et d'émissions ont, lorsque c'est possible, été calculés pour l'étude. Nous avons cependant choisi d'utiliser les valeurs du GIEC si un écart important avec nos valeurs calculées était constaté.

## 4 LOGICIEL DE CALCUL DE L'EMPREINTE DE L'AEROPORT

La contribution de ce projet se trouve dans l'amélioration d'un code python précédemment développé par Thierry DRUOT et des élèves de l'ENAC. Celui-ci est décrit brièvement ci-après :

### 4.1 Structure

Le logiciel se compose de 7 fichiers Python qui représentent respectivement : l'aéroport, les centrales d'énergie, les avions, un fichier de conversion d'unité, des données physiques et les autres outils nécessaires pour les calculs et finalement le fichier qui prend les entrées de dimensionnement et lance le calcul. Les entrées primaires sont les suivantes :

- Nombre de pistes
- Répartition d'avions par type (court, moyen, long courrier)
- Distance de l'approche
- Horaires d'ouverture de l'aéroport
- Distance ville-aéroport
- Répartition des centrales par type (photovoltaïque, éolien, nucléaire etc.)

Il est important de remarquer qu'il s'agit bien des entrées primaires et qu'il est aussi possible de changer quelques autres données dans le fichier qui lance le calcul, notamment des coefficients de consommation des différents modes de transport, la répartition des passagers entre eux, l'ensoleillement local etc.

Les sorties de logiciel sont ensuite :

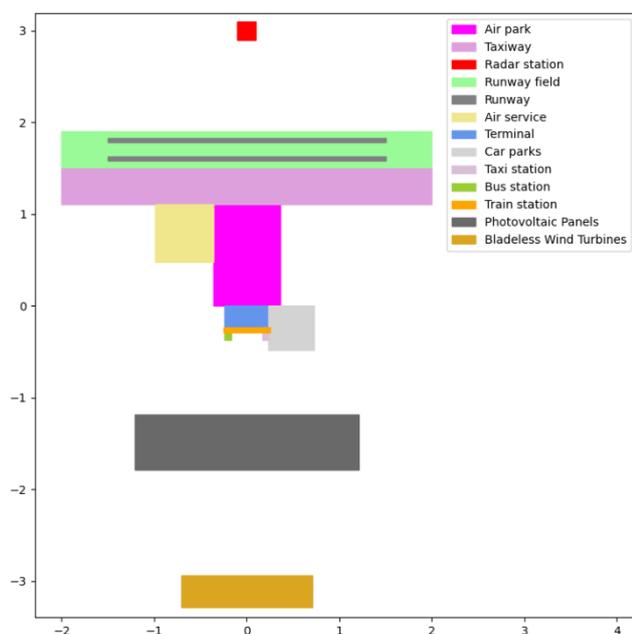
- Flux des passagers (entrants/sortants) avec leur moyen d'accès utilisé
- Nombre de mouvements d'avions (posé/décollé)
- Surface (totale + par composant en incluant les centrales)
- Puissance nécessaire nominale/max (totale + par composant)
- Consommation d'énergie jour/an (totale + par composant)
- CO<sub>2</sub> incorporées dans la construction (totaux + par composant)
- Données détaillées de fonctionnement prévu pour les centrales choisies (puissance, rendement, chiffrage des besoins en termes des matériaux, etc.)

Les composants évoqués précédemment sont les suivants :

- Pistes
- Taxiways
- Terminaux
- Stationnements d'avions
- "Station radar" (toutes les aides IFR ainsi que les besoins du contrôle)

- Ateliers d'entretien d'avions
- Parking voitures
- Gare de train
- Station de bus/taxi

La taille de chaque composant varie selon les entrées. Finalement, le logiciel produit une représentation graphique de la surface de ces derniers. Rq. : La surface du terminal correspond à la surface totale de tous les étages, l'empreinte réelle serait donc réduite de moitié dans un terminal conventionnel de deux étages. La [Figure 7](#) représente la sortie graphique du logiciel avec des entrées cohérentes à l'aéroport Toulouse-Blagnac.



**Figure 7 : Représentation graphique d'un aéroport type Toulouse-Blagnac.**

## 4.2 Calcul des coefficients liés aux émissions CO<sub>2</sub>

### 4.2.1 CO<sub>2</sub> incorporées dans la construction

Les émissions liées à la construction des différents composants de l'aéroport ont été calculées à l'aide du rapport d'évaluation de l'empreinte carbone pendant la construction d'une nouvelle piste à l'aéroport Londres-Heathrow [24]. Les résultats sont présentés dans la dernière ligne du tableau de composants entre les sorties du logiciel. Il y a aussi une valeur totale des émissions liées à la construction de l'aéroport qui prend 15% de marge en plus de la somme des émissions des composants individuels.

### 4.2.2 CO<sub>2</sub> liées au transport des passagers (ville-aéroport)

Pour le calcul des émissions liées aux transports, une estimation de l'énergie nécessaire au mouvement d'un passager sur 1km a été faite pour chaque mode, puis croisée aux estimations du GIEC [25] d'émission en eqCO<sub>2</sub> par

passager et par kilomètre. Le logiciel est ainsi capable de calculer l'énergie nécessaire au transport et de la traduire en émission eqCO<sub>2</sub>.

## 4.3 Implémentation des éoliennes sans pales

Comme il était déjà abordé dans le chapitre 2, les éoliennes sans pales imaginées frangibles représentent une nouvelle piste d'utilisation de l'énergie éolienne qui devrait être utilisable même par les aéroports. Pour le calcul de l'utilisation de ces dernières, les données du projet Vortex Bladeless ont été utilisées [13]. Cette compagnie propose des turbines en 3 tailles. Pour l'utilisation dans les alentours d'un aéroport, la turbine de 12 mètres de hauteur et d'une puissance maximale de 4kW a été choisie. Soulignons cependant que celles-ci pourraient être de taille réduite jusqu'à 3 mètres.

L'emplacement du champ des turbines va devoir satisfaire les exigences réglementaires qui ne sont pas encore formulées, mais on peut imaginer une note de dispositions qui serait publiée dans quelques années, comme cela existe déjà pour les panneaux photovoltaïques [26].

## 4.4 Scénarios de développement d'aéroport Toulouse-Blagnac

Les scénarios suivants imaginent un modèle d'aéroport type Toulouse-Blagnac disposant d'un site de production d'énergie hypothétique, qui se composerait d'une centrale photovoltaïque et d'une centrale éolienne sans pales frangibles, couvrant respectivement 75% et 25% du besoin total énergétique de l'aéroport.

L'énergie d'ensoleillement reçue par les panneaux peut être choisie librement comme une moyenne à l'année, ou une moyenne sur l'hiver de façon à dimensionner l'installation photovoltaïque pour "le pire des cas". Les valeurs moyennes d'ensoleillement peuvent être trouvées dans la [figure 9](#) (annexe). Pour ces scénarios, un ensoleillement moyen de la zone de Toulouse en l'hiver de 1,62 kWh/m<sup>2</sup>/jour a été choisie. Cette valeur correspond au rayonnement solaire moyen de 135 W/m<sup>2</sup>.

Un vent moyen de 8 nœuds est utilisé pour l'éolien, comme trouvé sur le site windfinder.com [27]. Le logiciel permet ensuite de chiffrer l'excès d'énergie disponible en été, qui pourrait être revendu aux particuliers ou réinjecté sur le réseau électrique. L'ordre de grandeur de la consommation électrique de l'aéroport et la forte différence de rayonnement entre les saisons pourrait ainsi permettre à l'aéroport de subvenir aux besoins électriques de nombreux riverains en été, en générant un excès d'énergie de l'ordre du GWh sur une année. Toutes les autres valeurs resteront inchangées.

### 4.4.1 Amélioration de la production d'énergie et de l'efficacité de la consommation dans 20 ans.

Ce scénario compare l'utilisation des centrales dans le rapport décrit précédemment avec la technologie d'aujourd'hui, et celle prévue pour les années 2040.

Comme nous pouvons voir sur la [figure 13](#) (annexe), l'efficacité des cellules utilisées dans les panneaux solaires montre un taux de croissance non négligeable pendant les dernières décennies. Le rendement maximal théorique des cellules est de 68,7% [28]. De nos jours, le rendement des panneaux solaires est aux alentours de 15% [29], [30]. Le calcul de ce scénario fait alors une hypothèse d'augmentation du rendement des panneaux solaires de 15% à 25% entre 2020 et 2040.

Pour les éoliennes sans pales, il est évident qu'il s'agit d'une nouvelle technologie qui n'est pas encore utilisée dans la vie courante. Le calcul fait donc une hypothèse d'une augmentation légère de la puissance maximale de 5%, c'est à dire de 4kW à 4.2kW.

Finalement, pour faire apparaître l'amélioration de l'efficacité de la consommation, le composant "terminal" a été choisi car il représente la majorité de la consommation journalière (plus de 80%). Par conséquent, ce composant est imaginé être la cible des améliorations de la consommation, grâce notamment à une amélioration du chauffage et de l'éclairage, ou à l'abandon des systèmes automatisés de traitement des bagages (dont l'impact est évalué à 10% des besoins du terminal). Le calcul prévoit donc une diminution de la puissance nominale du terminal de 20%. La [table 1](#) présente les résultats de ce scénario.

**Table 1 : Comparaison du modèle avant et après une amélioration de la production d'énergie et de l'efficacité de la consommation.**

	2020	2040
Consommation journalière [MWh]	179.7	152.7 <b>(-15%)</b>
Empreinte totale des centrales [km <sup>2</sup> ]	1.96	1.09 <b>(-44%)</b>

Le modèle prévoit une réduction de la consommation de 15%, et de l'empreinte des centrales de 44% avec les trois améliorations évoquées précédemment.

#### 4.4.2 Augmentation de l'attractivité des transports en commun

Ce scénario fait une hypothèse d'amélioration de la répartition des passagers parmi les différents modes de transport. Ceux-ci sont comparés selon ces trois valeurs relatives :

- Offre - proportion de toutes les destinations possibles qui peuvent être atteintes
- Commodité - confort, vitesse et ponctualité
- Coût

Ces trois valeurs entrent dans une formule simple pour calculer l'attractivité du mode de transport (Equation 1).

$$\text{attractivité} = \frac{\text{offre} * \text{commodité}}{\text{coût}} \quad (1)$$

Finalement, les attractivités des modes sont comparées entre elles et transformées en coefficients qui répartissent le nombre total de passagers dans les moyens de déplacement. Afin de pouvoir décrire la situation actuelle de la répartition des passagers, l'étude d'accessibilité des aéroports en Europe du Centre Aérospatial Allemand [31] ainsi que les résultats de l'enquête sur les passagers menée par l'autorité de l'aviation civile du Royaume-Uni [32][33] ont été utilisés. À partir de ces études, surtout de la [Figure 12](#) (annexe), les coefficients approximatifs actuels ont été établis et notés dans la [table 2](#).

**Table 2 : Situation actuelle de l'attractivité (répartition des passagers), offre, coût et commodité des différents modes de transport.**

	Attractivité	Offre	Commodité	Coût
Taxi	18%	1	1.7	1.2
Voiture - dépose minute	33%	1	1.7	0.7
Voiture - parking	16%	1	3.4	1
Bus	9%	0.4	0.7	0.4
Train/Tram	24%	1	0.8	0.4

La solution la plus simple et efficace pour une augmentation de l'attractivité des transports en commun (le tram et le bus dans ce cas) est de réduire les prix des billets de ces derniers. Ce scénario fait alors l'hypothèse d'une subvention sur le bus et le tram de 50%, ce qui doublerait l'attractivité de ces modes. La [Table 3](#) montre le changement de la répartition des passagers après cette subvention. Les valeurs des changements des rapports sont calculées par rapport aux coefficients avant la subvention.

**Table 3 : Situation de l'attractivité, offre, coût et commodité des différents modes de transport suite à l'augmentation de l'attractivité des transports en commun.**

	Attractivité	Offre	Commodité	Coût
Taxi	<b>13%</b> <b>(-28%)</b>	1	1.7	1.2
Voiture - d. min.	<b>25%</b> <b>(-24%)</b>	1	1.7	0.7
Voiture - parking	<b>12%</b> <b>(-25%)</b>	1	3.4	1
Bus	<b>13%</b> <b>(+31%)</b>	0.4	0.7	<b>0.2</b> <b>(-50%)</b>
Train /Tram	<b>37%</b> <b>(+35%)</b>	1	0.8	<b>0.2</b> <b>(-50%)</b>

Finalement, une comparaison des émissions d'équivalent CO<sub>2</sub> liées au transport est faite dans la [table 4](#) en utilisant le taux d'utilisation de la capacité de l'aéroport de 0.4, ce qui

correspond approximativement au nombre réel des passagers accueillis par l'Aéroport de Toulouse-Blagnac [34].

**Table 4 : Comparaison des émissions CO<sub>2</sub> liées au transport avant et après une augmentation de l'attractivité des transports en commun.**

	Avant	Après
Emissions CO <sub>2</sub> liés au transport [tonnes eqCO <sub>2</sub> ]	423.77	320.70 (-24%)

Le modèle prévoit alors réduction d'équivalent CO<sub>2</sub> de 24% avec une subvention des coûts des transports en commun de 50%.

## 5 CONCLUSION

L'étude a modélisé les flux d'énergie et de personnes au sein de l'aéroport Toulouse Blagnac. Elle a mis en évidence les gros contributeurs énergétiques et d'émissions, et leur sensibilité au changement.

Le potentiel de développement de l'aéroport est important, mais les défis à relever le sont d'autant plus. Dans cette étude, des hypothèses fortes ont été faites de façon à développer une intuition de ce que pourrait être l'aéroport de demain, et fait apparaître de nombreux axes d'améliorations. Il apparaît par exemple que les parkings et les systèmes de traitement de bagages robotisés ont un impact non négligeable sur le besoin en énergie. La réponse à apporter est cependant à nuancer, car la suppression d'un système robotisé crée des emplois et réduit la consommation d'un côté, mais augmente les coûts pour l'exploitant de l'autre. Ce surcoût pourrait en revanche être compensé par des coûts de mise en place et d'entretien plus raisonnables des énergies renouvelables.

Afin de valoriser les nombreuses possibilités d'une plateforme aéroportuaire, la mise en place d'une variété de sources d'énergies nous semble aussi nécessaire, l'énergie devant être disponible tout le temps aux heures d'ouvertures et quelles que soient les conditions météo. L'éolienne sans pale frangible, utilisée en complément d'une centrale photovoltaïque, a semblé intéressante lors de notre étude et pourrait être développée. De très nombreuses autres possibilités, présentées en première partie, existent aussi et devraient être étudiées au cas par cas par un exploitant qui devra considérer chaque option en fonction du flux de passagers attendu et de sa position géographique par exemple.

## REFERENCES

[1] 11115916, « Sustainable Innovation Forum - Post Event Report », *Issuu*.  
[https://issuu.com/climateaction/docs/sif15\\_post\\_event\\_report\\_v7](https://issuu.com/climateaction/docs/sif15_post_event_report_v7) (consulté le janv. 19, 2021).

[2] B. J. Brown, M. E. Hanson, D. M. Liverman, et R. W. Merideth, « Global sustainability: Toward definition », *Environ. Manage.*, vol. 11, n° 6, p. 713-719, nov. 1987,

doi: 10.1007/BF01867238.

[3] J. E. Moore, A. Mascarenhas, J. Bain, et S. E. Straus, « Developing a comprehensive definition of sustainability », *Implement. Sci.*, vol. 12, n° 1, p. 110, sept. 2017, doi: 10.1186/s13012-017-0637-1.

[4] K. Károly, « Rise and Fall of the Concept Sustainability », *J. Environ. Sustain.*, vol. 1, n° 1, p. 1-13, nov. 2011, doi: 10.14448/jes.01.0001.

[5] U. N. W. C. on E. and Development, *Our Common Future*. United Nations, 1987.

[6] J. Robinson, « Squaring the circle? Some thoughts on the idea of sustainable development », *Ecol. Econ.*, vol. 48, n° 4, p. 369-384, avr. 2004, doi: 10.1016/j.ecolecon.2003.10.017.

[7] J. Morelli, « Environmental Sustainability: A Definition for Environmental Professionals », *J. Environ. Sustain.*, vol. 1, n° 1, p. 1-10, nov. 2011, doi: 10.14448/jes.01.0002.

[8] N. U. Blum, M. Haupt, et C. R. Bening, « Why "Circular" doesn't always mean "Sustainable" », *Resour. Conserv. Recycl.*, vol. 162, p. 105042, nov. 2020, doi: 10.1016/j.resconrec.2020.105042.

[9] M. Cottignies, « Transport et développement durable », p. 28, 2019.

[10] « Aéroport Toulouse Blagnac », *Aéroport Toulouse-Blagnac*. <http://www.toulouse.aeroport.fr/societe-aeroport> (consulté le janv. 16, 2021).

[11] « Hyport, première station hydrogène vert à l'aéroport », *Aéroport Toulouse-Blagnac*. <http://www.toulouse.aeroport.fr/passagers/infos-vols/actualites-passagers/hypport-premiere-station-hydrogene-vert-l-aeroport> (consulté le janv. 16, 2021).

[12] I. Laplace et E. Malavolti, « Disruptive and sustainable innovation at airports: the case of hydrogen », présenté à TRA2020, 8th Transport Research Arena : Rethinking transport – towards clean and inclusive mobility, avr. 2020, Consulté le: oct. 20, 2020. [En ligne]. Disponible sur: <https://hal-enac.archives-ouvertes.fr/hal-02952163>.

[13] « How it works? - Vortex Wind Turbine in a Nutshell », *Vortex Bladeless Wind Power*. <https://vortexbladeless.com/technology-design/> (consulté le janv. 16, 2021).

[14] « Vortex Technical Paper - Bladeless Wind Turbines explained », *Vortex Bladeless Wind Power*, juin 07, 2018. <https://vortexbladeless.com/download-green-paper/> (consulté le janv. 19, 2021).

[15] T. Deppe et J. N. Munday, « Nighttime Photovoltaic Cells: Electrical Power Generation by Optically Coupling with Deep Space », *ACS Photonics*, nov. 2019, doi: 10.1021/acsp Photonics.9b00679.

[16] « Une centrale photovoltaïque à l'Aéroport Roland Garros | Air Journal ». <https://www.air-journal.fr/2019-11-18-une-centrale-photovoltaique-a-laeroport-roland-garros-5216302.html> (consulté le janv. 18, 2021).

[17] « Un réseau géothermique pour l'aéroport d'Orly », *Eco CO2*, juin 01, 2010. <https://www.ecoco2.com/blog/un-reseau-geothermique-pour-laeroport-dorly/> (consulté le janv. 18, 2021).

[18] « Power Road® ». <https://www.power-road.com/> (consulté le janv. 16, 2021).

[19] « Le Power-to-Gas n'est pas indispensable pour passer au 100% renouvelable », *Techniques de l'Ingénieur*. <https://www.techniques-ingenieur->

- fr.proxy.lib.enac.fr/actualite/articles/100-pour-cent-renouvelable-energie-hydrogene-42495/ (consulté le oct. 21, 2020).
- [20] J. Deschamps, « Filière hydrogène : principaux verrous et intérêt du Power to Gas », p. 13, 2019.
- [21] « | ENGIE », *Engie.com*.  
<https://www.engie.com/activites/infrastructures/power-to-gaz> (consulté le janv. 18, 2021).
- [22] « Le vecteur hydrogène », *ADEME*.  
<https://www.ademe.fr/expertises/energies-renouvelables-enr-production-reseaux-stockage/passer-a-laction/vecteur-hydrogene> (consulté le janv. 18, 2021).
- [23] « Infographics ».  
<http://www.robtaehnel.de/index.php/infodesign/infografiken> (consulté le janv. 18, 2021).
- [24] « 04\_Heathrow\_3RNW\_-\_Carbon\_Footprint\_Assessment.pdf ». Consulté le: janv. 16, 2021. [En ligne]. Disponible sur:  
[https://www.heathrow.com/content/dam/heathrow/web/common/documents/company/about/airports-commission/technical-assessment/04\\_Heathrow\\_3RNW\\_-\\_Carbon\\_Footprint\\_Assessment.pdf](https://www.heathrow.com/content/dam/heathrow/web/common/documents/company/about/airports-commission/technical-assessment/04_Heathrow_3RNW_-_Carbon_Footprint_Assessment.pdf).
- [25] Working Group III Technical Support Unit, « Climate Change 2014 Mitigation of Climate Change ». Cambridge university press, [En ligne]. Disponible sur:  
<https://www.ipcc.ch/report/ar5/wg3/>.
- [26] « 3\_2\_NIT\_Photovoltaique\_V4\_signee\_27juillet11.pdf ». Consulté le: janv. 16, 2021. [En ligne]. Disponible sur:  
[https://www.ecologie.gouv.fr/sites/default/files/3\\_2\\_NIT\\_Photovoltaique\\_V4\\_signee\\_27juillet11.pdf](https://www.ecologie.gouv.fr/sites/default/files/3_2_NIT_Photovoltaique_V4_signee_27juillet11.pdf).
- [27] Windfinder.com, « Windfinder.com - Wind and weather statistic Toulouse/Blagnac », *Windfinder.com*.  
[https://www.windfinder.com/windstatistics/toulouse\\_blagnac](https://www.windfinder.com/windstatistics/toulouse_blagnac) (consulté le janv. 18, 2021).
- [28] A. De Vos et H. Pauwels, « On the thermodynamic limit of photovoltaic energy conversion », *Appl. Phys.*, vol. 25, n° 2, p. 119-125, 1981, doi: 10.1007/BF00901283.
- [29] L. Dai-Prá, J. Dias, et A. Kieling, « Comparison between the Energy Required for Production of PV Module and the Output Energy Throughout the Product Life Time », *J. Energy Power Eng.*, vol. 9, juin 2015, doi: 10.17265/1934-8975/2015.06.011.
- [30] M. Raugei, P. Fullana-i-Palmer, et V. Fthenakis, « The energy return on energy investment (EROI) of photovoltaics: Methodology and comparisons with fossil fuel life cycles », *Energy Policy*, vol. 45, p. 576-582, juin 2012, doi: 10.1016/j.enpol.2012.03.008.
- [31] W. Grimme, D. P. Berster, et D. M. Gelhausen, « Airport Accessibility in Europe », *Final Rep.*, p. 32.
- [32] « T07\_2019.pdf ». Consulté le: janv. 17, 2021. [En ligne]. Disponible sur:  
[https://www.caa.co.uk/uploadedFiles/CAA/Content/Standard\\_Content/Data\\_and\\_analysis/Datasets/Passenger\\_survey/2019/T07\\_2019.pdf](https://www.caa.co.uk/uploadedFiles/CAA/Content/Standard_Content/Data_and_analysis/Datasets/Passenger_survey/2019/T07_2019.pdf).
- [33] « Modes of transport to selected UK airports 2019 », *Statista*.  
<https://www.statista.com/statistics/303824/modes-of-transport-to-selected-uk-airports/> (consulté le janv. 17, 2021).
- [34] « bulletin\_statistiques\_mensuel-201906.pdf ». Consulté le: janv. 17, 2021. [En ligne]. Disponible sur:  
[http://www.toulouse.aeroport.fr/sites/default/files/contrib/societe/lasociete/Stats\\_2019/bulletin\\_statistiques\\_mensuel-201906.pdf](http://www.toulouse.aeroport.fr/sites/default/files/contrib/societe/lasociete/Stats_2019/bulletin_statistiques_mensuel-201906.pdf).
- [35] Preist, Jonathan, « Sustainable development and the role of engineering », Airbus, nov. 06, 2020.
- [36] « L'enseiement en France ».  
<https://www.lepanneausolaire.net/l-enseiement-france.php> (consulté le déc. 12, 2020).
- [37] « Figure 1. Best Research-Cell Efficiencies from NREL. [2] », *ResearchGate*.  
[https://www.researchgate.net/figure/Best-Research-Cell-Efficiencies-from-NREL-2\\_fig1\\_327935098](https://www.researchgate.net/figure/Best-Research-Cell-Efficiencies-from-NREL-2_fig1_327935098) (consulté le janv. 16, 2021).

ANNEXES

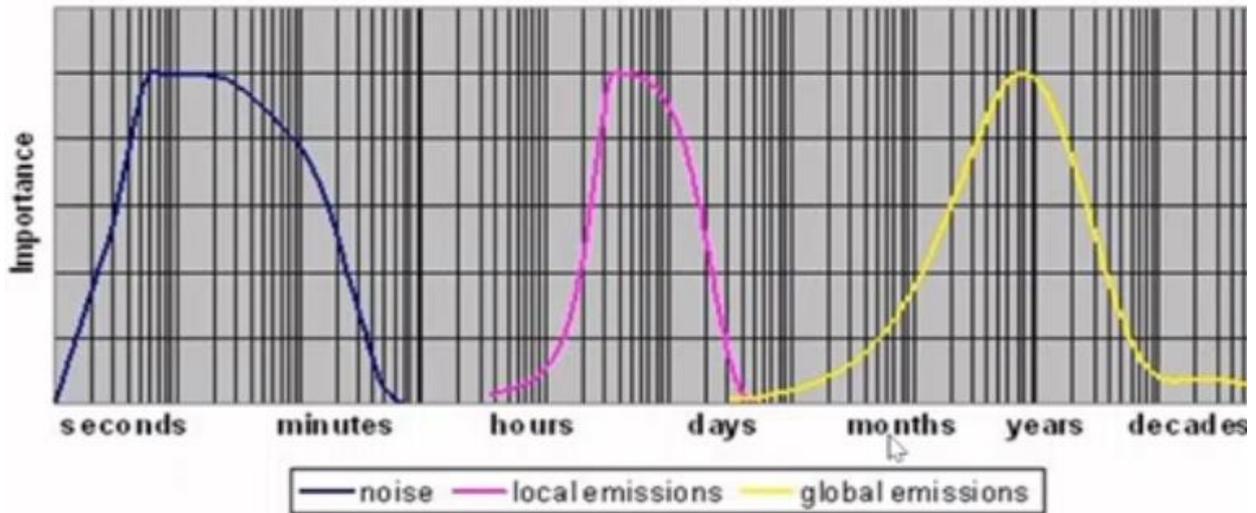


Figure 8 : Importance des nuisances sonores, émissions locales et globales en cours de temps[35]

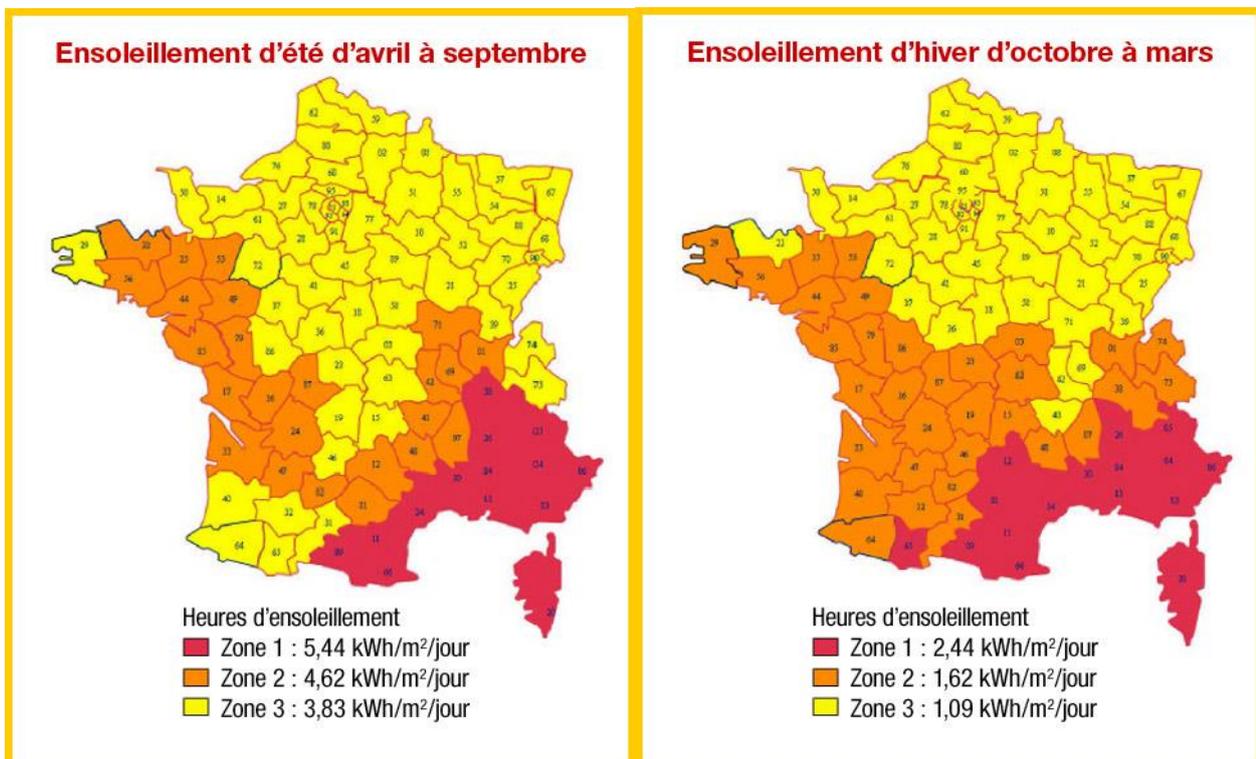


Figure 9 : Valeurs d'ensoleillement en France.[36]

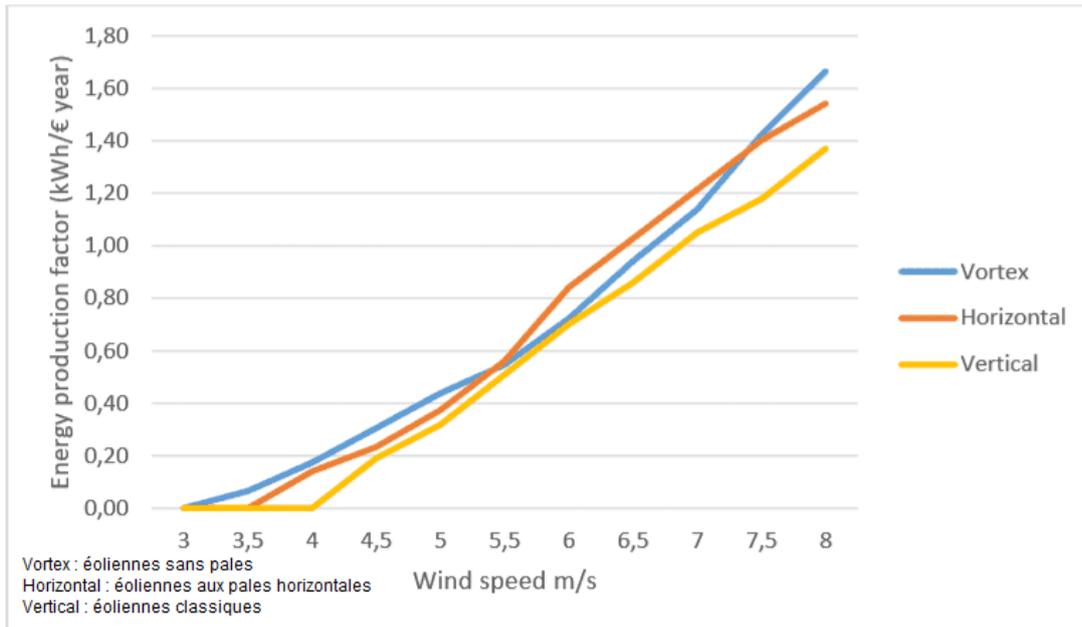


Figure 10 : Comparaison du facteur de production d'énergie pendant un an des différents types d'éoliennes.[13]

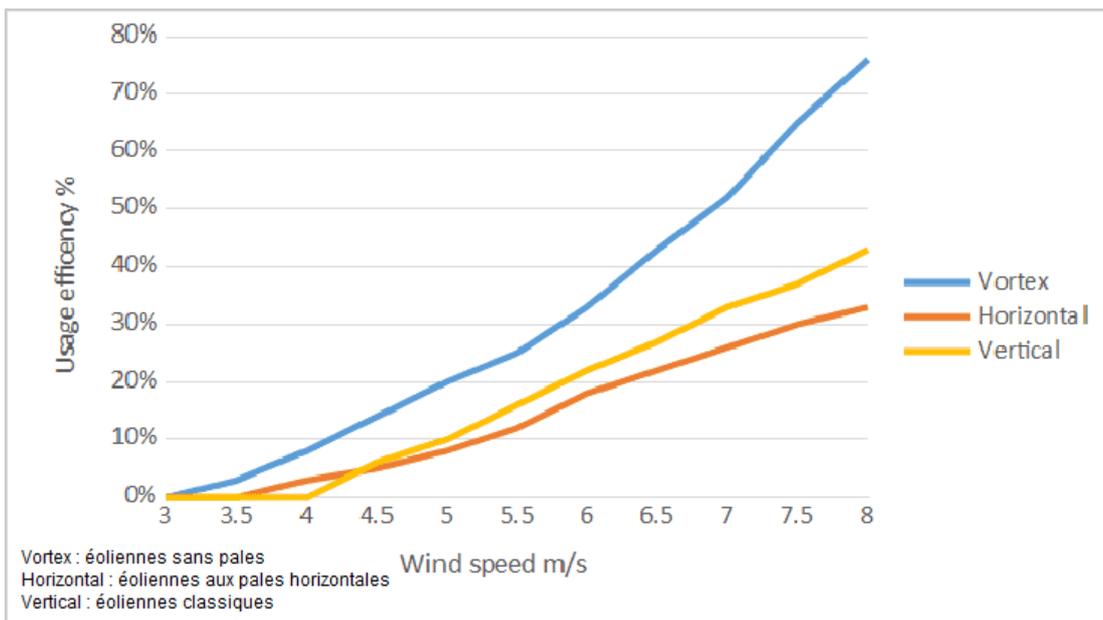


Figure 11 : Comparaison de l'efficacité de sortie des différents types d'éoliennes.[13]

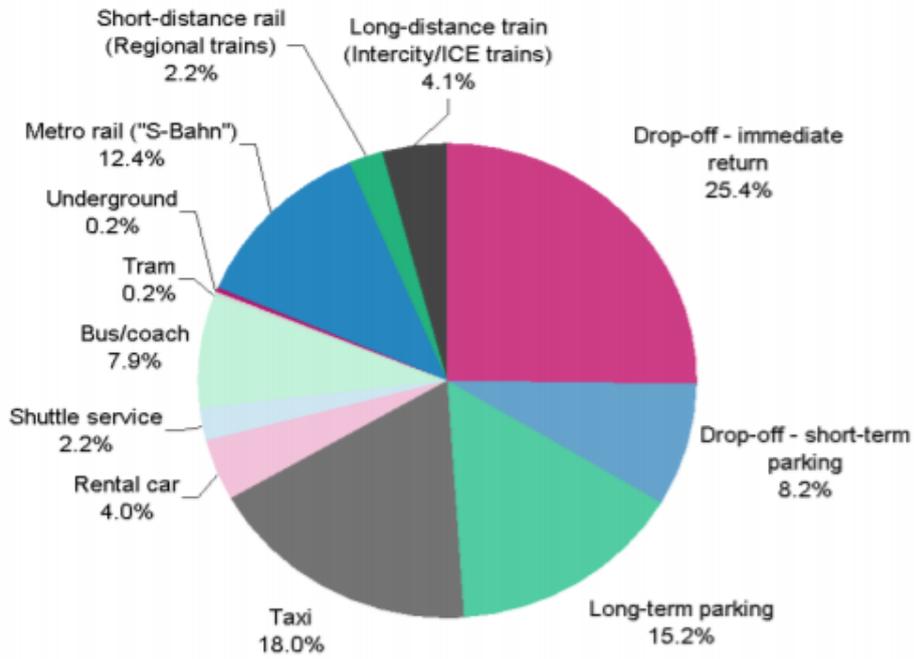


Figure 12 : Modes d'accès pour tous les passagers des aéroports allemands en 2008.[31]

# Best Research-Cell Efficiencies

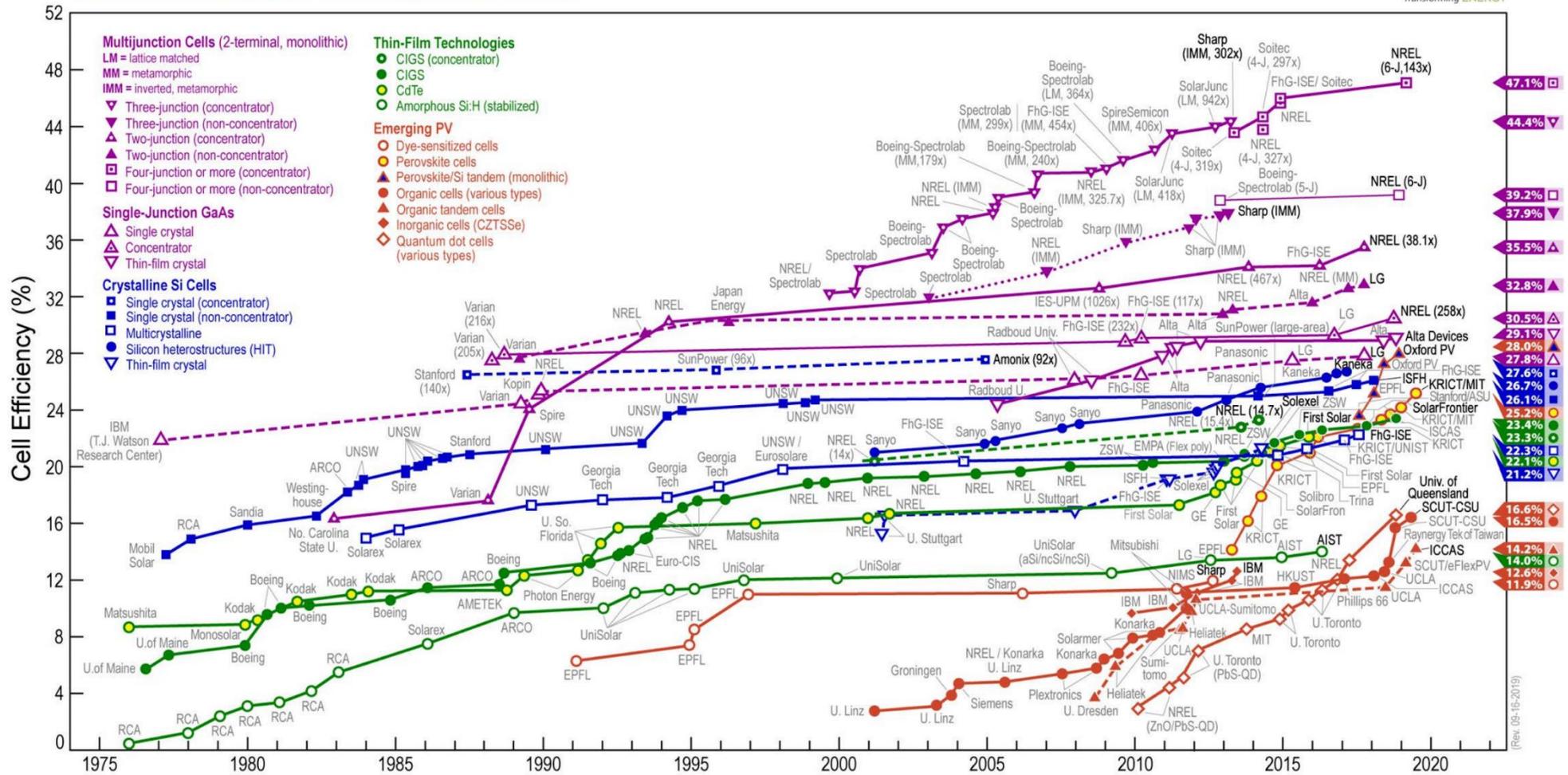


Figure 13 : Amélioration du rendement des cellules solaires entre années 1975 et 2020. [37]

Options	Direct emissions	Infrastructure & supply chain emissions	Biogenic CO <sub>2</sub> emissions and albedo effect	Methane emissions	Lifecycle emissions (incl. albedo effect)
	Min/Median/Max	Typical values			Min/Median/Max
<b>Currently Commercially Available Technologies</b>					
Coal—PC	670/760/870	9.6	0	47	740/820/910
Gas—Combined Cycle	350/370/490	1.6	0	91	410/490/650
Biomass—cofiring	n.a. <sup>i</sup>	–	–	–	620/740/890 <sup>iii</sup>
Biomass—dedicated	n.a. <sup>ii</sup>	210	27	0	130/230/420 <sup>iv</sup>
Geothermal	0	45	0	0	6.0/38/79
Hydropower	0	19	0	88	1.0/24/2200
Nuclear	0	18	0	0	3.7/12/110
Concentrated Solar Power	0	29	0	0	8.8/27/63
Solar PV—rooftop	0	42	0	0	26/41/60
Solar PV—utility	0	66	0	0	18/48/180
Wind onshore	0	15	0	0	7.0/11/56
Wind offshore	0	17	0	0	8.0/12/35
<b>Pre-commercial Technologies</b>					
CCS—Coal—Oxyfuel	14/76/110	17	0	67	100/160/200
CCS—Coal—PC	95/120/140	28	0	68	190/220/250
CCS—Coal—IGCC	100/120/150	9.9	0	62	170/200/230
CCS—Gas—Combined Cycle	30/57/98	8.9	0	110	94/170/340
Ocean	0	17	0	0	5.6/17/28

Figure 14 : Émissions de certaines technologies d’approvisionnement en électricité (gCO<sub>2</sub>eq/kWh) [25] - page 1333.

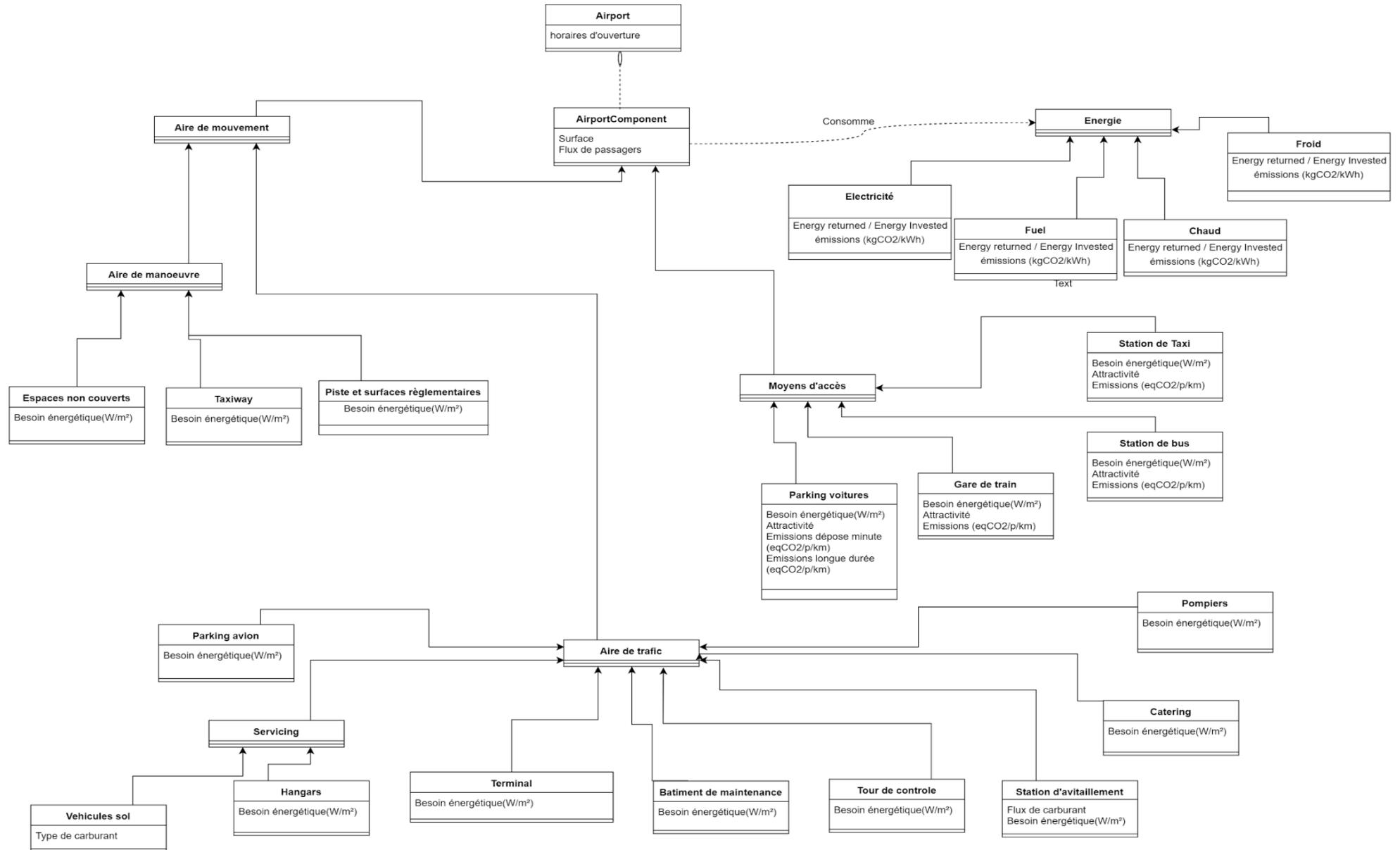


Figure 15 : Schéma UML d'une première approche de modélisation d'aéroport.

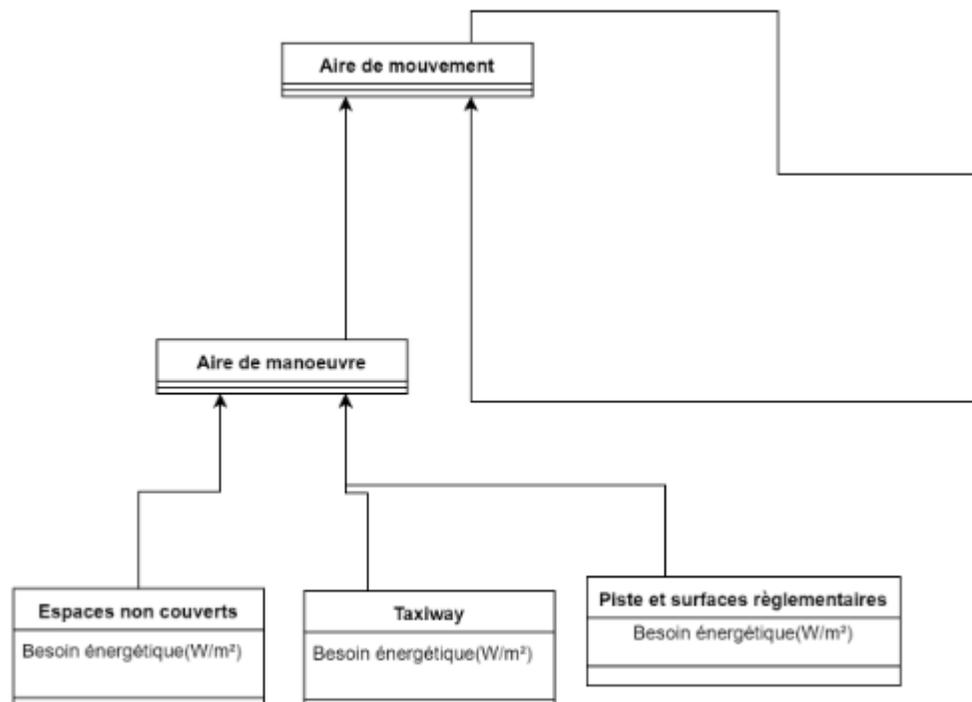


Figure 16 : Première approche d'une modélisation de l'aire de mouvement.

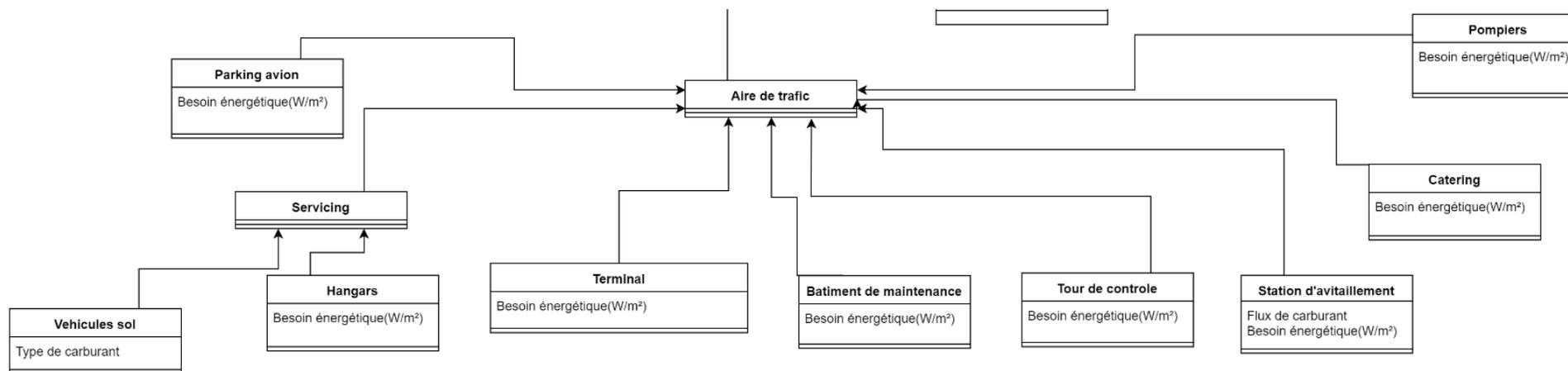


Figure 17 : Première approche d'une modélisation de l'aire de trafic.

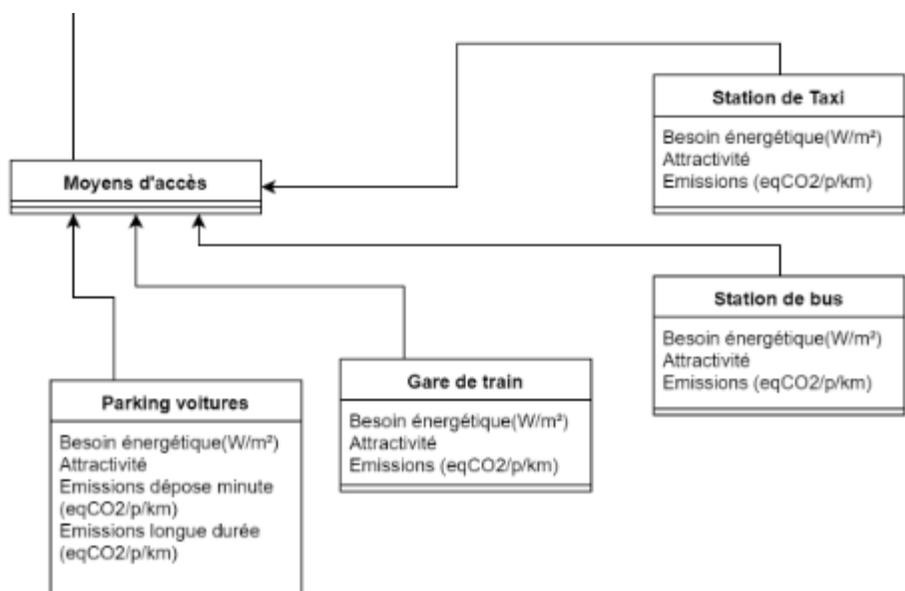


Figure 18 : Première approche d'une modélisation des moyens d'accès.

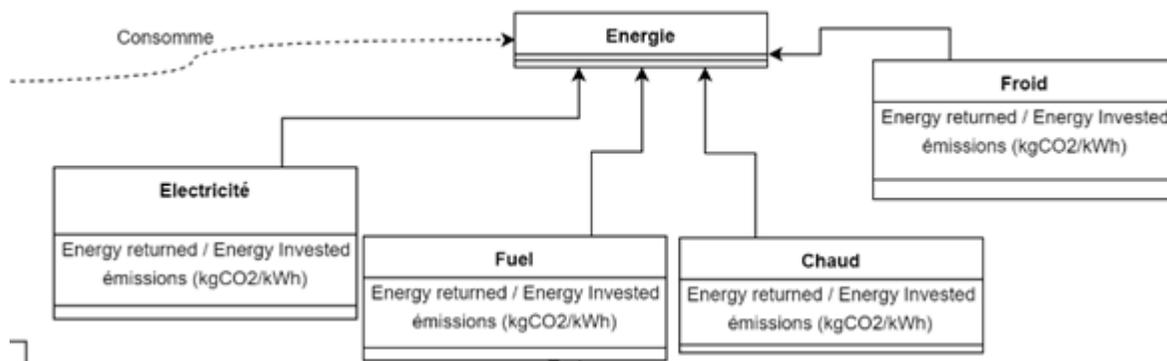


Figure 19: Première approche d'une modélisation des centrales de production.