

Thème : Bâtiment à énergie positive

Quelles perspectives pour la production et le stockage d'électricité ?

- *Rapport Global* -

Novembre

Janvier

Mars

Juin

Équipe TBD10

Abou Saab Christelle
Dutheil Pierre
Galle Virgile
El Jaouhari Adam
Tian Yannick



Référent Pédagogique

Pierre JEHEL

Client Projet

Sarah LAVAUX



Thème : Bâtiment à énergie positive

**Le bâtiment à énergie positive sera
solaire ou ne sera pas :
quelles perspectives pour la
production et le stockage
d'électricité ?**

- Rapport Premier - Novembre -

Équipe TBD10

Abou Saab Christelle
Dutheil Pierre
Galle Virgile
El Jaouhari Adam
Tian Yannick



Référent Pédagogique

Pierre JEHEL

Client Projet
Sarah LAVAUX



Sommaire

Introduction

Partie 1 : Synthèse sur le contexte de la production électrique

- 1-1- L'Electricité dans le monde
- 1-2- Législation en France
- 1-3- La ville de Grenoble
- 1-4- Perspective au regard du contexte international relatif à l'énergie nucléaire

Partie 2 : les énergies renouvelables

- 2-1- Energie solaire
 - 2-1-1-Le solaire photovoltaïque
 - 2-1-2-Le solaire thermique basse température
 - 2-1-3-Le solaire thermique haute température
 - 2-2- Energie éolienne
 - 2-3- Energie Hydraulique – Hydroélectricité
 - 2-4- Le bois énergie ou biomasse solide
 - 2-5- La géothermie
- Conclusion 2

Partie 3 : Présentation des différentes technologies actuelles et futures en matière de cellules photovoltaïques

- 3-1- Présentation des différentes technologies
 - a) Les filières à base de silicium :
 - b) Les voies d'amélioration
 - c) Les filières non-silicium
 - d) La filière organique
 - e) Les cellules au TiO₂ (type Graetzel)
- 3-2- Courbes comparatives en fonction du temps

Partie 4 : Le stockage énergétique

- 4-1- Les Smart-grids ou « réseaux intelligents »
- 4-2- Les différentes solutions connues aujourd’hui pour répondre au défi du stockage
 - 4-2-1- Les moyens ayant des temps de stockage de l’ordre de la minute
 - a) Les condensateurs et les bobines
 - b) La cinétique et volant inertiel
 - 4-2-2- Les moyens permettant un stockage hebdomadaire
 - a) Le stockage par air comprimé
 - b) Le stockage par batterie
 - c) Le stockage thermique
 - 4-2-3- Le stockage très longue durée : mensuel et saisonnier voire annuel
 - a) Le stockage hydraulique (les barrages)
 - b) La batterie à dihydrogène

Conclusion 4

Ouverture : L’isolation thermique

Conclusion

Annexes

Bibliographies

Remarque : Nous avons rajouté en annexe la partie sur le chauffage, car nous avons remarqué qu’elle n’était pas en relation directe avec le plan prévu ; mais que sa lecture permet une meilleure vue d’ensemble du thème.

Introduction

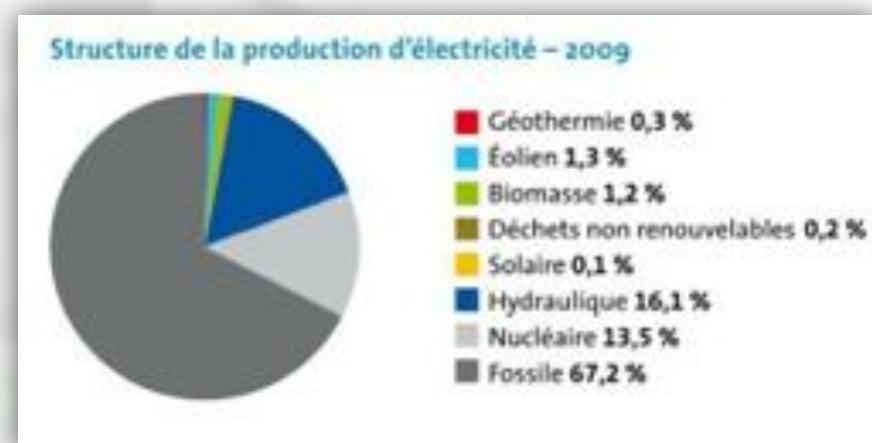
Fournies par le soleil, le vent, la chaleur de la terre, les chutes d'eau, les marées ou encore la croissance des végétaux, les énergies renouvelables n'engendrent pas ou peu de déchets ou d'émissions polluantes. Elles participent à la lutte contre l'effet de serre et les rejets de CO₂ dans l'atmosphère, facilitent la gestion raisonnée des ressources locales et génèrent des emplois. Le solaire (photovoltaïque et thermique), l'hydroélectricité, l'éolien, la biomasse, la géothermie sont des énergies flux inépuisables par rapport aux « énergies stock » tirées des gisements de combustibles fossiles en voie de raréfaction : pétrole, charbon, lignite, gaz naturel.



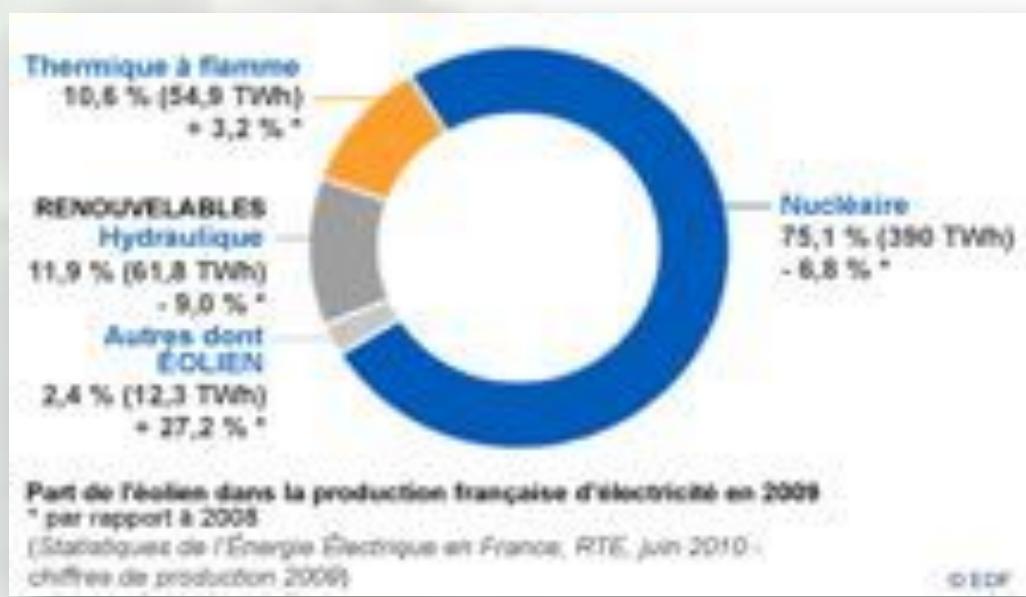
L'électricité « verte » renouvelable dans le monde

Les énergies renouvelables, et particulièrement l'électricité produite à partir de l'éolien et du solaire, connaissent depuis le début des années 1990 un développement important. Les politiques et programmes de soutien mis en place au Nord, sur fond d'effet de serre, et au Sud, pour répondre à une demande conséquente mais dispersée, en sont les principaux moteurs.

La production d'électricité renouvelable a atteint 3801,3 TWh en 2009, soit 19,1% de la production d'électricité mondiale. Cette part reste supérieure à la production d'électricité d'origine nucléaire (13,5% en 2009), mais largement inférieure à l'électricité produite à partir des combustibles fossiles (67,2%).



De plus, la production brute d'électricité renouvelable a augmenté de 1000,7 TWh entre 1999 et 2009 (de 2809,6 TWh à 3810,3 TWh), soit une croissance annuelle moyenne de 3,1%.

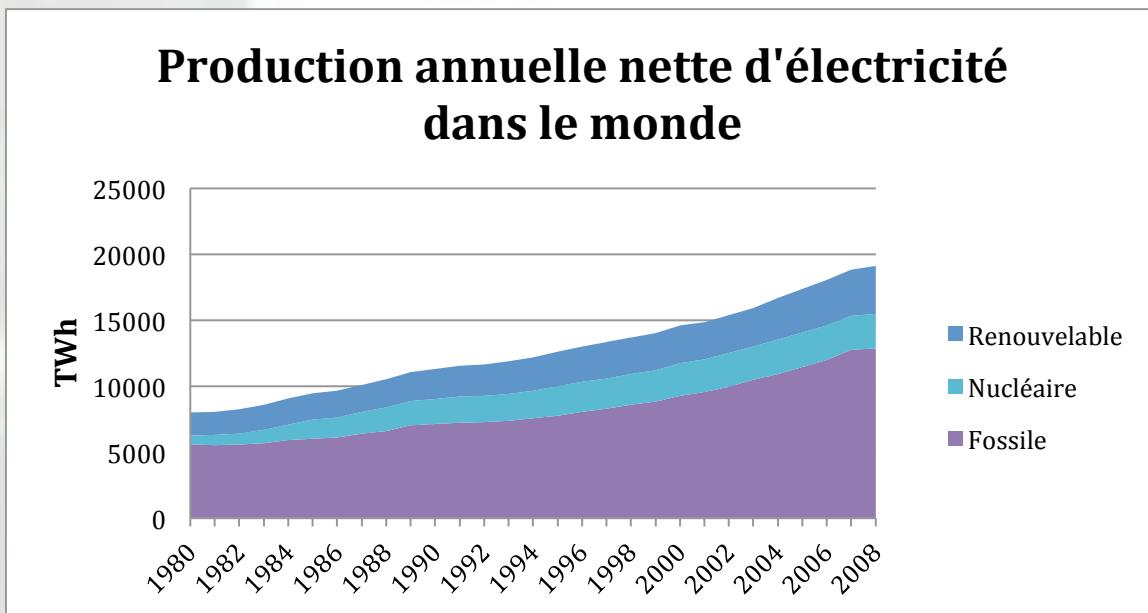


Partie 1 : Synthèse sur le contexte de la production électrique

Après avoir présenté comment était repartie l'énergie électrique dans le monde ainsi que la répartition des énergies renouvelables, il est important de se pencher sur où se trouve le chantier des énergies renouvelables dans la production d'électricité en France.

1-1- L'Electricité dans le monde

En ce début de XXI^e siècle, le contexte énergétique et environnemental est marqué par la question de la pérennité à tous les niveaux. Sur le plan énergétique, on remarque **le déséquilibre entre une production énergétique fondée sur des ressources minérales limitées et une consommation en forte croissance**.



Sur le plan environnemental, les activités humaines exploitent les ressources procurées par la biosphère terrestre et rejettent les résidus de leurs productions sous forme de déchets dans cette même biosphère. Il est alors crucial de **réduire au maximum les pollutions atmosphériques**. C'est l'objectif notamment de plusieurs traités internationaux comme le protocole de Kyoto qui vise à réduire les émissions de gaz à effet de serre.

A l'échelle mondiale, **le secteur du bâtiment représente 30 à 40% de la consommation totale d'énergie et contribue fortement aux impacts environnementaux d'origine anthropique**. Il présente donc un fort potentiel d'amélioration à la fois au niveau énergétique et environnemental.

Dans le cadre du développement durable, **de nouveaux standards et de nouveaux engagements ont été établis**. Par exemple, le « facteur 4 » consiste à diviser par 4 les émissions de gaz à effet de serre d'un pays ou d'un continent donné, à l'échelle de temps de 40 ans. De même en France, la réglementation thermique 2020 suite au Grenelle de l'Environnement obligera les constructions neuves à compter de la fin 2020 à avoir une consommation d'énergie primaire inférieure à la quantité d'énergie renouvelable produite dans ces constructions.

La tendance en ce moment est effectivement la création de **bâtiments performants** qui respectent des critères stricts vis-à-vis de l'environnement. Parmi les nombreux concepts de bâtiments performants, **le bâtiment à énergie positive (BEPOS)** est le plus récent.



1-2- Législation en France

En France, on retrouve ces préoccupations environnementales dans les textes réglementaires à propos des installations de production d'électricité, notamment dans certains articles du *Code général des collectivités territoriales*. On voit notamment que l'autorisation d'exploitation d'une installation de production d'électricité est basée sur plusieurs critères : la sécurité, le choix des sites, l'efficacité énergétique, les capacités techniques, la compatibilité et le respect de la législation sociale.

De plus, dans la mesure où l'électricité produite n'est pas destinée à être vendue à des clients éligibles, les communes et les établissements publics de coopération **peuvent aménager, exploiter, faire aménager et faire exploiter toute nouvelle installation hydroélectrique d'une puissance maximale de 8 000 kW** (puissance maximale des machines électrogènes susceptibles de fonctionner simultanément), toute nouvelle installation utilisant les autres énergies renouvelables, toute nouvelle installation de valorisation énergétique des déchets ménagers ou assimilés, ou toute nouvelle installation de cogénération ou de récupération d'énergie provenant d'installations visant l'alimentation d'un réseau de chaleur lorsque ces nouvelles installations se traduisent par une **économie d'énergie et une réduction des pollutions atmosphériques**. (Article L2224-32)

En ce qui concerne les **installations individuelles de production**, un crédit d'impôt est mis en place pour certaines installations en faveur des économies d'énergie et du développement durable. **La production d'énergie photovoltaïque est favorisée** par la possibilité de vendre celle-ci à 3-4 fois le prix de vente d'EDF. Ce revenu photovoltaïque étant de plus **non imposable** si la puissance de l'installation est égale ou inférieure à 3kWc et si l'installation est raccordée au réseau public en 2 points au plus.

Type et puissance de l'installation	Taux d'échec (cf. NAW)			
	16/09/2011 au 30/06/2011	01/07/2011 au 30/09/2011	01/10/2011 au 31/12/2011	
Résidentiel	Intégration au bâti [0-9kWc]	42	42,75	41,67
	[9-50kWc]	40,29	37,75	38,33
Aménagement au bâti	Intégration amplifiée au bâti [50-100kWc]	30,39	27,46	26,89
	[0-9kWc]	40,4	36,74	33,25
Autres bâtiments	Intégration amplifiée au bâti [50-100kWc]	30,39	27,46	26,89
	[0-9kWc]	30,2	31,25	31,83
Tout type d'installation	Intégration amplifiée au bâti [50-100kWc]	30,39	27,46	26,89
	[0-12kWc]	32,99	33,99	33,78

<http://www.photovoltaque.info>

1-3- La ville de Grenoble

La ville de Grenoble, réputée pour être l'une des plus polluées de France, a mis en place une **politique de développement durable active** (plan énergie, guide pratique environnemental à l'usage des aménageurs..) dans le cadre de la « **charte HQE** (Haute Qualité Environnementale) » de l'aménagement urbain applicable à toutes les opérations d'aménagement urbain et de construction de bâtiments.

On peut remarquer plusieurs engagement concrets déjà en cours qui se basent sur cette charte comme le **plan climat** qui est une démarche volontaire pour répondre aux enjeux de l'énergie et du climat donc le but est de réduire les émissions de gaz à effet de serre pour contribuer autant que possible au « Facteur 4 » et d'adapter le territoire aux changements des conditions climatiques.

En chiffre, on appelle cet objectif **l'objectif « 3X14 »** :

- Réduire de 14% les émissions de CO2 du territoire par rapport à 2005
- Réduire de 14% la consommation énergétique par habitant par rapport à 2005
- Augmenter la part des énergies renouvelables pour atteindre 14% de l'énergie consommée (au lieu de 8% aujourd'hui)

Gaz Electricité de Grenoble est une société d'économie mixte locale qui est très impliquée au sein des instances professionnelles, notamment dans le monde de l'Energie. Très importante pour la ville de Grenoble, en 2005, GEG a couvert environ 25% de sa consommation annuelle. Elle possède 8 centrales hydroélectriques et développe des programmes de solaire photovoltaïque et de cogénération de toutes tailles.

Cette volonté d'agir pour le bien de l'environnement s'est aussi concrétisée lors du projet récent **d'aménagement de la caserne de Bonne** mené par le cabinet DEVILLERS. Entièrement conçu selon les normes HQR, la ZAC de Bonne est un centre commercial exemplaire intégré à l'éco-quartier de Bonne où tout a été imaginé pour préserver l'environnement aux alentours du centre. Ce centre commercial est ouvert au public depuis le 15 septembre 2010.

Le projet de la caserne de Bonne est inscrit dans le programme européen **Concerto**, démarche ou label qui tient à faire respecter le « facteur 4 ». La politique générale est de rendre le quartier au maximum productif de l'énergie qu'il consomme.



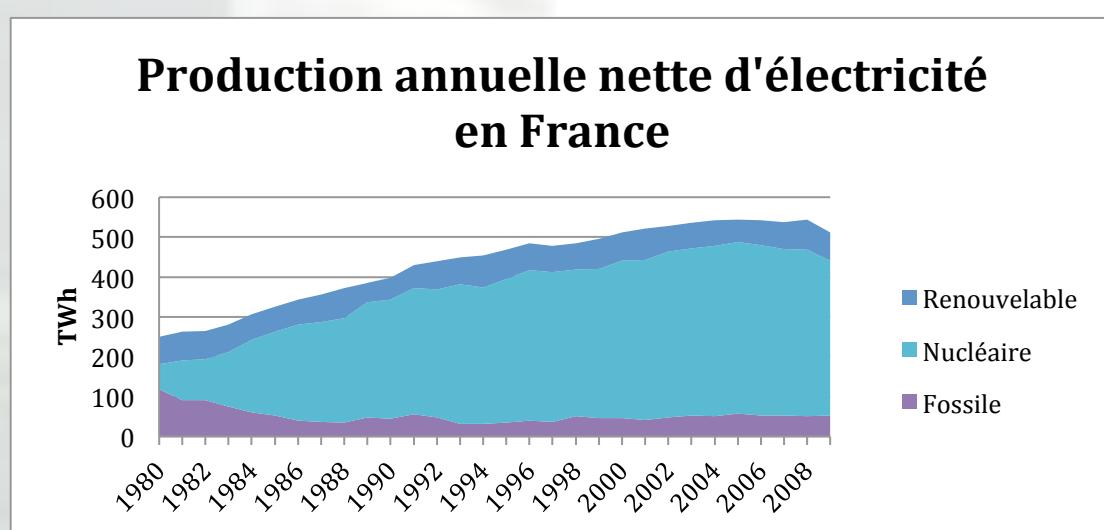
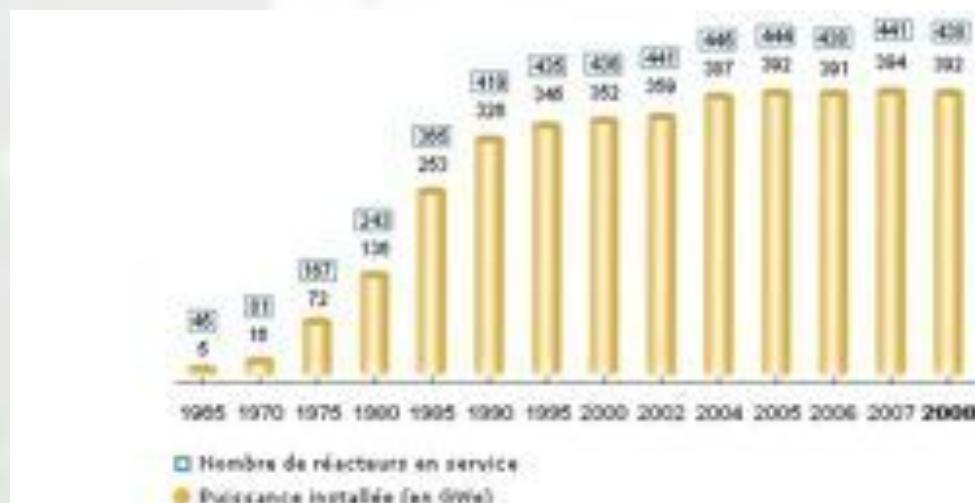
Caserne de Bonne

Pour la production énergétique électrique, une centrale photovoltaïque d'une surface inédite de 1000m² placée sur le toit du centre commercial va permettre de produire 100 MWh/an destinés en priorité à l'éclairage de jour, à la ventilation et à la sécurisation des espaces publics. Un système de cogénération pour 450 logements est aussi expérimenté en vue de sa reproductibilité ultérieure. Une installation à base de moteur à gaz permet ainsi de couvrir 100% des besoins en électricité (1250 MWh/an) et 50% des besoins en chauffage (2500 MWh/an).

1-4- Perspective au regard du contexte international relatif à l'énergie nucléaire

A partir des années 1970, la raréfaction des énergies fossiles et la volonté des états de réduire leur dépendance énergétique ont favorisé le développement du nucléaire.

Ainsi, en France, on peut voir que notre production électrique est essentiellement nucléaire.



L'énergie nucléaire est aujourd'hui **nécessaire pour atteindre les objectifs de réduction des émissions de CO₂ préconisés par la communauté scientifique** et validés au niveau politique par un nombre de plus en plus grands de pays. En effet, les émissions de gaz à effet de serre sur l'ensemble du cycle de vie de l'énergie nucléaire sont du même ordre que celles de l'éolien.

Selon la brochure *Climate change* la production électronucléaire permet ainsi d'éviter l'émission d'environ 2 milliards de tonnes de CO₂ chaque année dans le monde, soit 7 % des émissions mondiales annuelles (28.8 milliards de tonnes émises en 2007 selon le WEO 2009).

De plus, le nucléaire est une **source d'énergie compétitive et insensible aux prix des combustibles fossiles**. Alors que le prix des énergies fossiles agit fortement sur les coûts de l'électricité produite par les centrales thermiques au charbon et surtout au gaz, la part de la matière première dans le coût final de l'électricité nucléaire est très faible (un doublement du prix de l'uranium n'entraîne qu'une augmentation du coût de production de l'ordre de 5%).

Cependant, aujourd'hui, suite à la catastrophe de la centrale nucléaire de Fukushima au Japon, la sûreté des centrales a une fois de plus été remise en cause. Le gouvernement et l'Union européenne avaient demandé aux opérateurs d'effectuer des tests de résistance pour vérifier si leurs réacteurs étaient capables de résister à des phénomènes climatiques extrêmes. **L'opinion publique reste confuse et craintive**, ce qui entraîne un ralentissement de la croissance du nucléaire.

Les perspectives de ce manque de confiance envers la technologie nucléaire incitent le **développement massif de nouvelles technologies de production d'énergie renouvelable**. Mais il semble clair que tant qu'il n'existe pas de produit de substitution viable, il est impossible d'arrêter les centrales nucléaires, surtout en France.

Partie 2 : les énergies renouvelables

Après avoir cité quelques chiffres et réglementations sur cette production « verte » d'électricité, présentons les différents modes de production en nous attardant sur l'énergie solaire, axe majeure de notre étude.

Les énergies renouvelables sont des énergies inépuisables. Fournies par le soleil, le vent, la chaleur de la Terre, les chutes d'eau, les marées ou encore la croissance des végétaux, leur exploitation n'engendre pas ou peu de déchets et d'émissions polluantes. Ce sont les énergies de l'avenir. Aujourd'hui, elles sont sous-exploitées par rapport à leur potentiel. Ainsi, les énergies renouvelables couvrent seulement 20 % de la consommation mondiale d'électricité.



2-1- Energie solaire

2-1-1-Le solaire photovoltaïque

L'énergie solaire photovoltaïque (à distinguer de l'énergie solaire thermique) provient de la conversion de la lumière du soleil en électricité au sein de matériaux "semi-conducteurs". Cette énergie est apportée par les photons qui heurtent les électrons et les libèrent, induisant le courant électrique.



Les cellules photovoltaïques ont pour constituant de base les semi-conducteurs, dont le plus exploité est le silicium. Elles sont assemblées en modules solaires, qui alimentent des sites isolés (bateaux, maisons...) ou le réseau de distribution général. Les modules produisent du courant continu, qu'il faut convertir en courant alternatif pour l'adapter à la plupart des appareils électriques.

Des applications "au fil du soleil" (pompe à eau, ventilation) peuvent exploiter directement l'électricité produite en fonction du soleil. En revanche, l'utilisation en site isolé demande de pouvoir stocker le courant pour une utilisation la nuit ou par mauvais temps.

Les besoins électriques d'un foyer de 4 personnes représentent environ 2 500 kWh par an (hors chauffage électrique et eau chaude sanitaire). Un système de 25 m² (2,5 kWc) peut donc produire l'équivalent de cette consommation. Toutefois, si ce même foyer engage une démarche d'économie d'énergie (remplacement des ampoules par des lampes fluo-

compactes, appareils de classe A et suppression des veilles inutiles, etc.), il pourra dégager un excédent et rentabiliser plus rapidement son installation photovoltaïque. Aujourd’hui, le prix de l’installation sans aide publique rendrait le coût du kilowattheure photovoltaïque bien plus élevé que celui du kilowattheure hydraulique ou fossile. En France, le prix de l’électricité est bon marché et le retour sur investissement long (le prix de l’électricité “ordinaire” continuera d’augmenter). De plus, le coût des panneaux a diminué de 5 % par an depuis vingt ans et cette baisse devrait continuer. À partir d’un éloignement de 2 à 3 km d’un réseau, le photovoltaïque se révèle moins coûteux qu’une extension de lignes.

2-1-2- Le solaire thermique basse température

L’énergie solaire peut servir à chauffer l’eau sanitaire grâce à un chauffe-eau solaire individuel, mais aussi alimenter un système ayant la double fonction de chauffage et de production d’eau chaude : le système solaire combiné (SSC), aussi appelé “combi”.

2-1-3-Le solaire thermique haute température

La concentration optique des rayons du soleil permet d’obtenir de très hautes températures aux centrales solaires à concentration : la chaleur produite est généralement comprise entre 400 °C et 1 000 °C, ce qui permet de produire de la vapeur. En faisant tourner une turbine, la vapeur génère de l’électricité destinée au réseau de distribution général. C’est l’hélio thermodynamique.

On distingue deux usages principaux :

- la production de chaleur (thermique),
- la production d’électricité (thermodynamique).

Attention, les systèmes solaires à concentration collectent uniquement le rayonnement solaire direct, alors que les capteurs solaires plans non concentrateurs et les modules photovoltaïques captent également le rayonnement diffus.



Un avantage significatif du solaire haute température par rapport au photovoltaïque ou à l’éolien, il est possible de stocker la chaleur solaire pour une utilisation à court terme et

locale, ou sous forme d'hydrogène, par exemple pour une utilisation différée ou éloignée du site.

L'exploitation de l'énergie solaire sous cette forme requiert des conditions d'ensoleillement qui sont propres à certaines régions du monde seulement. Le rayonnement solaire direct est plus abondant (supérieur à 2 000 kWh/m².an) dans une zone géographique appelée la ceinture solaire. Les meilleures zones sont le Sahara, les déserts australiens ou californiens mais également les zones méditerranéennes.

2-2- Energie éolienne



Le vent fait tourner les pales qui entraînent le générateur électrique, puis, le courant produit est rendu compatible avec le réseau de distribution qui le reçoit. Le rendement des parties électriques avoisine souvent 100 %, les pertes étant plutôt d'origine mécanique (frottements, rendements des engrenages, etc.). Globalement, les aérogénérateurs sont des machines qui affichent un bon rendement, puisqu'elles sont en mesure de transformer en électricité 30 à 50 % de l'énergie du vent.



2-3- Energie Hydraulique – Hydroélectricité



Une petite centrale hydroélectrique exploite la force de l'eau pour générer de l'électricité. Le principe : capter l'eau et la forcer à entraîner une turbine reliée à une génératrice.

Si la centrale est en site isolé non relié au réseau électrique, le courant est consommé sur place. Dans le cas contraire, les kilowattheures sont vendus à la compagnie d'électricité dont dépend le lieu, et injectés dans le réseau de distribution.

En effet, on peut exploiter l'énergie hydraulique grâce à son énergie cinétique d'une part (courants marins, marées, vagues - énergies marines – hydroliennes) et son énergie potentielle d'autre part (chutes d'eau, barrages).



2-4- Le bois énergie ou biomasse solide

La biomasse solide représente les matériaux d'origine biologique qui peuvent être employés comme combustible pour la production de chaleur ou d'électricité.



La biomasse solide se prête mieux à la production de chaleur pour le chauffage, la production de vapeur pour des procédés industriels, le séchage... Il est aussi possible de produire de l'électricité, revendu sur le réseau : la vapeur produite fait tourner des turbines qui génèrent du courant. Toutefois, la production d'électricité seule à partir de biomasse solide présente un rendement faible. Aussi, la cogénération est-elle principalement utilisée pour produire de l'électricité en plus de la chaleur.

La « flamme verte » s'adresse à trois types d'utilisateurs : pour l'usage des particuliers, la machine à cogénération domestique, alimentée aux granulés de bois, permet de produire de

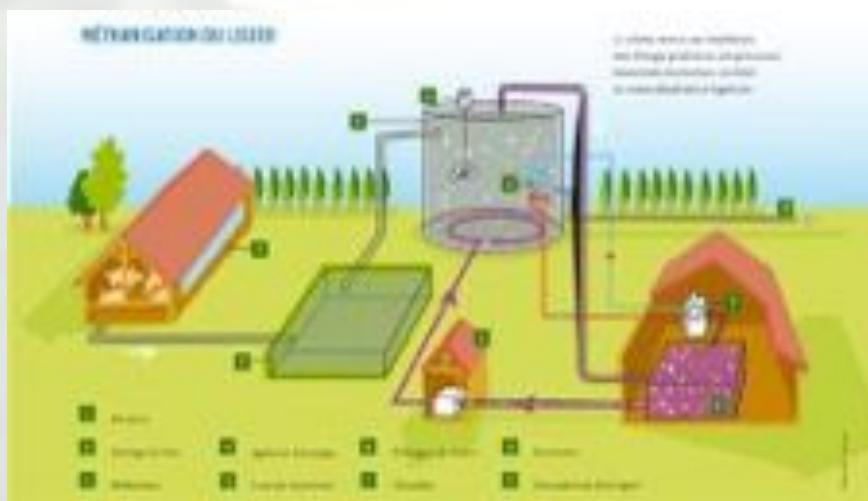
l'électricité et de la chaleur. Les entreprises optent plutôt pour des grosses chaudières automatiques, des réseaux de chaleurs, des systèmes de cogénération.

Malgré son intérêt, la biomasse solide est confrontée à divers obstacles. Les coûts d'équipement et les frais d'exploitation sont encore élevés par rapport aux autres combustibles fossiles. Et malgré les innovations technologiques et les performances, le chauffage au bois garde toujours une image vieillotte d'énergie du passé, perçue – à tort – comme une énergie épuisable et polluante.

Biogaz

Le biogaz est un gaz combustible, mélange de méthane et de gaz carbonique, additionné de quelques autres composants. Il provient de la décomposition selon un processus de fermentation en sous-sol durant vingt-cinq ans dans des centres de stockage des déchets.

Le biogaz est l'une des seules énergies renouvelables à pouvoir être transformée en toute forme d'énergie utile. Il peut être brûlé dans une chaudière pour produire de la chaleur sous forme d'eau chaude ou de vapeur, voire d'air chaud pour les applications de séchage. Le biogaz peut aussi alimenter une turbine pour produire de l'électricité injectée dans le réseau électrique, c'est le cas du biogaz de décharge notamment. La cogénération est très souvent utilisée dans les stations d'épuration urbaines, les unités de méthanisation de déchets solides et les unités agricoles.



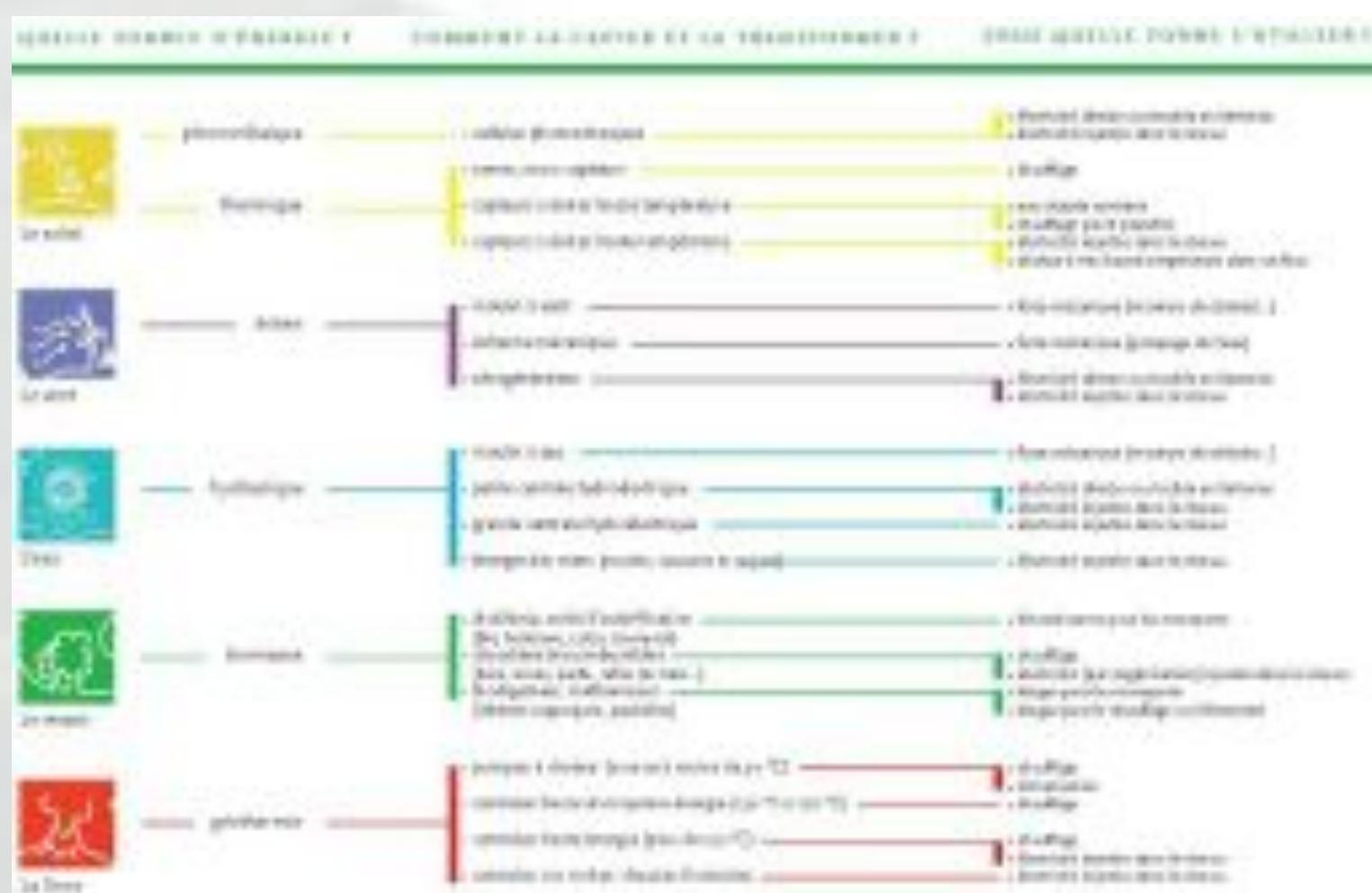


2-5- La géothermie

La géothermie est l'exploitation de la chaleur stockée dans le sous-sol. L'utilisation des ressources géothermales se décompose en deux grandes familles : la production d'électricité et la production de chaleur. Dans les couches profondes, la chaleur de la Terre est produite par la radioactivité naturelle des roches qui constituent la croûte terrestre : c'est l'énergie nucléaire produite par la désintégration de l'uranium, du thorium et du potassium.



Conclusion 2 :



Partie 3 : Présentation des différentes technologies actuelles et futures en matière de cellules photovoltaïques

Vu que l'énergie solaire est prépondérante et plus efficace que les autres formes d'énergies renouvelables, nous allons comparer de plus près les différents types de panneaux photovoltaïques intervenant dans cette branche de production.

Le marché actuel des panneaux solaires appliqués au bâtiment repose actuellement sur 2 technologies de cellules photovoltaïques, toutes deux basées sur l'élément silicium. Nous allons ici présenter les différentes alternatives à cette technologie et les différentes voies d'amélioration envisageables.

3-1- Présentation des différentes technologies

a) Les filières à base de silicium

Les deux principales filières actuelles utilisant le silicium sont basées sur des technologies à cristaux.

Dans les deux cas l'effet photovoltaïque est créé par des cristaux qui selon le mode de refroidissement du silicium en fusion donne 1 seul ou plusieurs cristaux, le produit est alors placé dans les cellules photovoltaïques.



La technologie monocristalline offre un rendement légèrement plus important : 120W/cm² contre 100W/cm² pour le polycristallin. Ces rendements sont élevés dans le domaine du photovoltaïque puisqu'ils correspondent à des taux de conversion de la puissance radiative en puissance électrique de l'ordre de 13 à 15% ; le rendement maximale théorique étant de 31% et les meilleures performances réalisées avoisinant 25%.

Les principaux défauts de ces technologies sont :

-une perte de rendement d'environ 0,5% (en taux de conversion) pour une hausse d'un degré,

-un rendement faible pour un éclairement faible. (Plage de rendement?)

Le coût de revient moyen par mètre carré de ces installations est sensiblement le même pour

les deux types : soit environ PRIX

Par ailleurs une autre technologie est présente sur le marché, à base de silicium amorphe, technologie dite silicium « couche mince ». Elle possède un taux de conversion allant de 5 à 9% mais est réellement moins chère que les deux précédentes : PRIX, grâce à la technique de fabrication. Sa principale utilité est la création de panneaux solaires souples.

b) Les voies d'amélioration

Les principales améliorations de rendement actuelle sur des panneaux à base de silicium cristallin sont réalisées en superposant des cellules convertissant chacune une différente partie du spectre solaire (superposition d'une cellule monocristalline et d'une cellule amorphe). Cette technologie permet une augmentation du rendement (rendement record en laboratoire : environ 40% sous une concentration de 240 soleils). Ce type de cellule est actuellement utilisée dans le domaine spatial mais n'est pas encore considéré comme commercialisable à cause du surcoût du à la superposition.

On notera qu'il existe aussi des cellules triples, qui sont des cellules tandem auxquelles on rajoute une couche de semi-conducteur différent (tellurure de cadmium ou mélange CIS présentés plus bas).

Une technologie actuellement développée est la technologie hybride, qui est une cellule monocristalline avec une couche liquide (souvent de l'eau). L'intérêt est de permettre le fonctionnement des cellules dans un domaine de température plus adapté et de récupérer un liquide chaud. Ainsi le taux de conversion des cellules peut aller jusqu'à environ 17%. Cette technologie est déjà commercialisée par la société SOLAIRE2G, elle a un rendement de 15%, avec un prix de 6,7€ pour 1Wc qui correspond à 1000€ par m².

c) Les filières non-silicium

Les deux principales filières sans silicium sont basée sur le Tellurure de Cadmium ou le mélange CIS: Cuivre/Indium/Sélénium (Cette dernière est actuellement dérivée en C/I/Gallium/S et C/I/G/S/Disulphide, mais ces voies reste non développable à cause de la radioactivité du Cadmium). L'un des avantages commun à ces deux technologies est qu'elles s'appliquent en « couche mince » et peuvent ainsi être fixées sur des supports souples.

Le CIS possède un coût de production plus bas que celui des filières mono/polycristallines notamment grâce au mode de fabrication du film de semi-conducteur, mais reste malgré tout élevée par rapport aux filières silicium cristalline. Néanmoins, les réductions de coût attendues à moyen terme pour cette technologie sont très prometteuses. Cette technologie permet d'atteindre des rendements allant de 10 à 12%. Elle possède aussi les avantages suivants :

- faible sensibilité aux variations de température,
- faible sensibilité à la baisse de luminosité.

On reste donc dans des produits destinés aux marchés de niche.

La filière à base de CdTe possède le gros désavantage d'avoir un élément radioactif dans ses composants, nous la développerons donc pas ici.

d) La filière organique

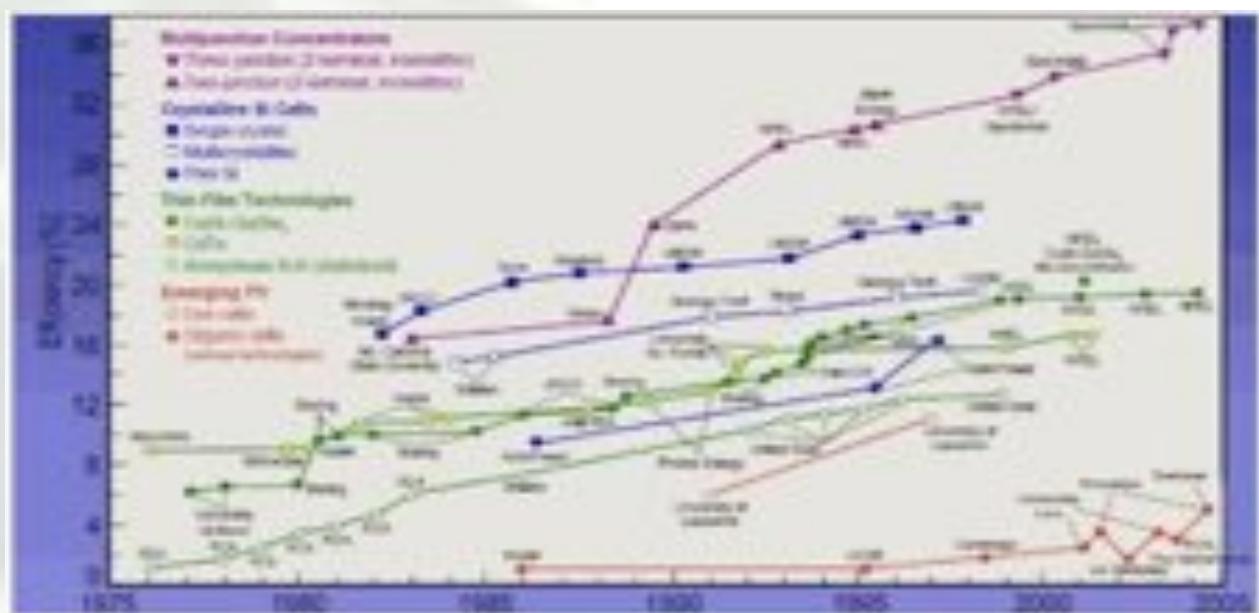
Les cellules sont créées par vaporisation de cellules organiques sur un support et est donc adaptable aux supports souples. Par ailleurs elle permet des économies en matériau semi-conducteur et son industrialisation sera facilitée par la connaissance des modes de production des écrans de type OLED.

Cependant le taux de conversion record obtenu en laboratoire (université de Dresde, Allemagne) reste actuellement de 5,9% seulement.

e) Les cellules au TiO₂ (type Graetzel)

Ces cellules sont organiques (et en garde tous les avantages) et basées sur le dioxyde de titane et permettent d'obtenir un rendement de 9 à 12% en laboratoire. Elles sont actuellement au stade préindustriel. Mais leur durée d'amortissement énergétique est d'environ 3 mois car leur fabrication est très énergivore. Le coût en matière première pour une cellule est de 43,6€/m² (pour le cours actuel du Ruthénium...).

3-2-Courbes comparatives en fonction du temps



Toutes ces technologies présentent des rendements qui diffèrent selon le constructeur en raison des couches de verres pouvant réguler la température, du type de résine utilisé pour l'anti-réflexion ...

Partie 4 : Le stockage énergétique

Après avoir résolu le problème de la production d'énergie, qu'elle soit verte ou non, le problème du stockage se trouve être une priorité dans le cadre d'une étude d'un quartier à énergie positive. Cependant, le stockage d'énergie est un problème qui ne se pose que depuis très peu de temps, les solutions industriellement réalisables sont donc très limitées. Il convient tout de même de les étudier. De plus, il faut explorer de nouvelles pistes innovantes de stockage qui émergent chaque jour.

Tout d'abord, nous présenterons des connaissances sur les smart-grids. Puis nous étudieront les différentes manières plus ou moins novatrices, originales et rentables de stocker l'énergie sous diverses formes.



4-1- Les Smart-grids ou « réseaux intelligents »

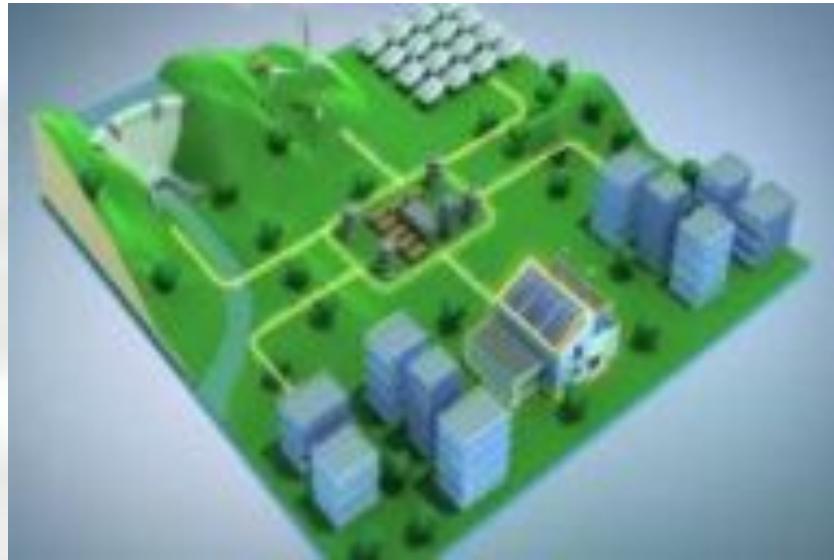
Tout d'abord, il est important de noter que les smart-grids que nous allons vous présenter ne sont pas une véritable solution au problème du stockage de l'énergie. Mais il peut être une alternative pendant un certain moment.

Qu'est-ce qu'un 'smart-grid' ?

C'est un réseau intelligent qui connecte différents services électroniques entre eux et avec différentes sources d'énergie électrique. Ce réseau possède les informations sur tous les membres qui font partie de lui et peut ainsi optimiser (ou plutôt ici minimiser) les pertes énergétiques.

Les smart-grids n'ont pu se développer qu'avec l'essor des moyens de communication car ils font appel constamment à des données qui sont variables avec le temps. Ils nécessitent aussi de très bons algorithmes d'optimisation.

De plus, les smart-grids s'utilisent à toutes les échelles : continentale et nationale, régionale et locale mais aussi chez un particulier



A quoi servent ces ‘smart-grids’ ?

Ces réseaux ont plusieurs avantages dont les plus grands sont les suivants :

- Lorsqu'un particulier (dans le cas des quartiers à énergie positive) ou une usine produit de l'électricité, il faut qu'il l'a transmette immédiatement à un demandeur, sinon soit l'électricité produite est perdue (perte énergétique) soit on l'a fait tourner sur le réseau ce qui créerai de gros problèmes pour l'acheminement de l'électricité chez les particuliers. Les smart-grids cherchent sur toute l'étendue du réseau à qui on doit donner l'énergie et quand on doit fournir de l'énergie pour minimiser les pertes.
- Ils informent les gens sur la consommation des autres, de la leur, et peut ainsi proposer un comportement à avoir pour ne pas dépenser l'énergie quand tout le monde utilise l'énergie ce qui a pour effet de diminuer les pics énergétiques. Le compteur intelligent propose différents solutions avec les budgets qui leur sont associées pour favoriser les bons comportements, non énergivores
- Ils permettent d'éviter tout manque d'électricité en décidant d'approvisionner de l'endroit le plus prêt, et le plus rentable. Pour ceci le smart-grid doit être assez étendu pour avoir des sources d'électricité toujours opérationnelle.

En quoi cela ne constitue-t-elle pas une solution au problème du stockage ?

En effet, ceci n'est pas véritablement une solution à notre problème. Car si les moyens de production fournissent pendant un certain temps de l'énergie, certes le surplus d'énergie produit est consommé au maximum ; mais quand la production s'arrête (ce qui peut être assez fréquent avec les énergies renouvelables) si aucune des sources contenues dans le réseau ne peut produire de l'énergie, le réseau tombe ce qui peut être catastrophique.

On voit bien qu'il n'y a pas stockage de l'énergie mais optimisation de sa répartition, ce qui est déjà un gros avantage

4-2- Les différentes solutions connues aujourd’hui pour répondre au défi du stockage

Il y a différentes manières de classer ces solutions pour stocker de l’énergie : la forme sous laquelle elle stocke l’énergie, leur maturité industrielle, leur rendement, leur temps caractéristique de stockage, leur coût, leur densité de stockage, etc...

Nous avons opté de les classer suivant leur capacité à stocker longtemps l’énergie ou non.

On remarque que ces temps de stockage sont très variables, ils vont de l’ordre de la seconde à celle de la saison ! De plus, les mises en œuvre de ses moyens de stockage sont très divers et demandent des connaissances dans beaucoup de domaines : de la mécanique en passant par l’électromagnétisme et bien sur la thermodynamique toujours présentes dans notre étude des bâtiments à énergie positive.

4-2-1- Les moyens ayant des temps de stockage de l’ordre de la minute

Il faut noter que ces moyens de stockage vont être très peu utiles dans notre étude, ils ne seront que mentionnés et brièvement expliqués pour voir si ultérieurement ils pourraient être adaptés pour nous servir dans notre projet.

a) les condensateurs et les bobines

Ce sont principalement des outils électromagnétiques qui ont des temps de stockage aussi faibles. Les condensateurs et les bobines emmagasinent de l’énergie quand ils sont dans un circuit. Cette énergie emmagasinée est $\frac{1}{2}CU^2$ (C la capacité du condensateur et U la tension aux bornes du condensateur) pour le condensateur et $\frac{1}{2}LI^2$ (L l’inductance de la bobine et I l’intensité qui la traverse) pour la bobine. Il faut donc essayer de travailler avec de très forte capacités et/ou inductances sachant qu’en plus leur constante de déchargement dépend aussi de ses deux grandeurs et qu’en les augmentant, on augmente leur durée de stockage.

Cependant, ses temps caractéristiques sont toujours trop faibles et restent de l’ordre au maximum de 10s.

On essaie donc de développer des ‘supra-condensateurs’ et surtout des bobines avec de très grosses inductances mais les recherches dans ce domaine ne sont pas encore à leur maturité.

L’avantage non négligeable de ses supports de stockage est leur rendement qui est supérieur à 90% !



b) La cinétiqe et volant inertiel

Le principe est de stocker l'énergie dans un volant d'inertie. Cette technologie étant relativement jeune, il faut beaucoup d'autres éléments à prendre en compte dans son montage tels que des paliers magnétiques, une enceinte sous vide, un moteur/générateur... tout ceci rend cette solution peut rentable.

Il serait intéressant d'étudier les contraintes de ce solide pour le dimensionner et choisir ces composantes (qui sont aujourd'hui principalement des fibres de carbone, très résistantes aux efforts de torsion)

A noter que dans ce cas le temps de stockage est légèrement plus long : il peut aller jusqu'à 10 min. Néanmoins son rendement diminue légèrement (entre 70 et 90%)

4-2-2-Les moyens permettant un stockage hebdomadaire

a) le stockage par air comprimé

Cette méthode est aussi très peu développée. Elle consiste à envoyer de l'air comprimer dans une enceinte et à le faire sortir quand on veut en le faisant passer par une bobine comme dans un barrage. Le principe est le même qu'un barrage, est la technologie des turbines, bien qu'elle soit déjà bien maîtrisée, peut y voir dans cette technologie une possibilité d'essor. Elle a un rendement de 70% (comme un barrage) mais un cout légèrement supérieur (400 €/kWh)

Cette solution à l'avantage d'être écologiquement vertueuse, elle ne demande pas beaucoup de développement technologique mais surtout une industrialisation du processus. Cependant, ceci pose quelques problèmes de sécurité : où stocke-t-on cet air comprimé ? Et avec quels dangers ?

b) le stockage par batterie

Actuellement, le seul stockage couramment utilisé est le stockage par batteries par sa simplicité d'utilisation. Donc ce moyen est déjà bien industrialisé ce qui est un atout considérable par rapport aux autres moyens étudiés. Ce moyen de stockage permet de stocker sur assez longue durée, mais seulement de faibles quantités d'électricité.



Il en existe différents types : rechargeable ou non, recyclable...

Les plus utilisées sont les batteries électrochimiques telles que :

- Au métal (zinc, fer ou magnésium)
- Au sodium à électrolyte d'alumine (soufre ou chlorure de nickel)
- Au lithium à électrolyte sel fondu
- Au lithium-carbone...

Elles ont chacune leurs particularités qui peuvent être exploitées suivant les objectifs que l'on souhaite atteindre (il serait donc intéressant de se pencher sur les propriétés chimiques des piles citées voire même d'autres pour la suite du projet)

Mais comme nous l'avons dit, les batteries dont nous disposons aujourd'hui ne stockent que des faibles quantités (<200kWh) ce qui est problématique dans l'optique de stocker pour une période assez longue. Il faudrait donc voir s'il est possible d'augmenter la capacité de ces batteries.

c) Le stockage thermique

Le stockage thermique de l'énergie peut se présenter sous plusieurs formes. On peut utiliser les fortes capacités thermiques de certains liquides, les conductivités très variables suivant la température de certains matériaux, les changements d'états et la chaleur latente de certaines phases aqueuses ou gazeuses...

Cependant, ce 'chantier' semble être en construction parce que beaucoup de solutions semblent nouvelles, avec des rendements tournant autour de 65 à 85%, mais aucune de ses solutions ne parait avoir été appliquées.

Il pourrait être important de tester certaines méthodes théoriques proposées (exemples de notre livre de transferts thermiques p118) et de faire des mesures pour les comparer aux autres moyens de stockage.

Il est tout de fois important de noter que ce moyen de stockage ne peut être envisagé qu'à très haute température en ce qui concerne notre étude sinon ce moyen de stockage ne serait pas rentable

4-2-3- Le stockage très longue durée : mensuel et saisonnier voire annuel

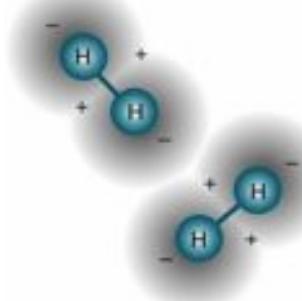
a) Le stockage hydraulique (les barrages)

Nous avons déjà introduit les chiffres pour les barrages dans la partie sur le stockage avec de l'air comprimé.

Les barrages sont en effet de très bon moyen de stockage. Etant développé depuis très longtemps, cette technologie est très bien maîtrisée, les risques sont connus et sont assez bien minimisés aujourd'hui. Mais le gros inconvénient de ce type de stockage est qu'il ne peut pas se faire partout, mais seulement dans les régions avec un dénivelé assez important et une source d'eau.

b) La batterie à dihydrogène

Beaucoup d'ingénieurs et notamment des ingénieur-architectes croient fermement que la première source de stockage dans les bâtiments à énergie positive sera celle-là. Elle a une durée de stockage très grande mais comme les autres batteries, sa capacité est limitée, il va donc falloir la travailler pour arriver à un chiffre comparable à celle de la consommation des habitants d'aujourd'hui ou de demain.



Conclusion 4 :

Toutes ces solutions ont un intérêt plus ou moins grand pour résoudre le problème de stockage de l'énergie. Les valeurs à considérer sont nombreuses parmi lesquelles on peut avoir :

- Stocker longtemps
- Vite délivrer cette énergie au consommateur
- Avoir un bon rendement lorsqu'on convertit les énergies
- Avoir une bonne maturité industrielle pour avoir des coûts rentables

Ainsi on peut dresser un tableau des solutions que l'on vient de présenter

Energie	Rendement	Densité de stockage (kJ/m^3)	Coût puissance (Euros/kW)	Coût énergétique (Euros/kWh)
Gaz naturel	0,75	5 (grande densité de stockage)	200 à 300	0,3 à 0,5
Thermique	0,65 à 0,85	20 à 150	200 à 500	0,7 à 1,5
Pression	0,7	2 à 3	400	1 à 20
Chimique thermique	0,7 à 0,9	5 à 150	75 à 200	300 à 2000
Chimique hydrogène	< 0,30	< 100	1500 à 3000	0,13 à 3
Cinétique	0,7 à 0,9	10 à 150	200	200 à 300
Electro- magnétique	0,8 à 0,95	0,3 à 5	100 à 400	0,3 à 1 à 10 ⁷
Electro- statique	0,8 à 0,95	1 à 10	100 à 200	3 à 15 à 10 ⁷

(Source : Technique de l'ingénieur) (A noter que ces rendements paraissent tout de même un peu élevés, il sera donc crucial de refaire quelques mesures ou faire des recherches plus approfondies sur ces rendements puisque l'enjeu du stockage est crucial dans notre problématique)

Mais elles ne seront sûrement pas à envisager chacune séparément. Celles qui pourront faire l'objet de notre étude pour le projet, devront être étudiées plus en profondeur mais surtout en corrélation les unes avec les autres pour trouver la meilleure combinaison possible.

Conclusion : Ce sont en utilisant et en combinant smart-grid et moyens de stockage différents que nous arriverons à couvrir les demandes en énergies, même quand celles-ci sont très importantes pendant un cours instant (comme les heures de pointe en fin de journée). Il va donc falloir étudier les courbes de demande journalière et annuelle en énergie, les superposer avec les courbes de production des énergies renouvelables et adapter nos moyens de stockage ces courbes et à l'environnement de Grenoble pour résoudre notre problème.

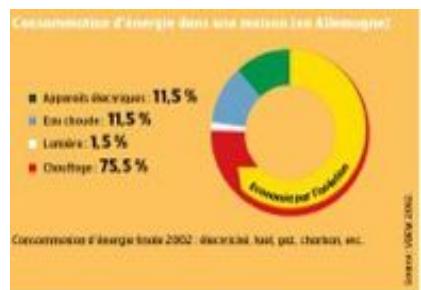
Ouverture: L'isolation thermique

L'isolation thermique est une sorte de « stockage » énergétique, puisqu'elle permet de ne pas perdre l'électricité ayant servi au chauffage du bâtiment. Il serait quand même dommage de perdre cette énergie électrique qu'on a tant cherché à produire et stocker.

Pour bien tirer profit du stockage il faut réduire la consommation d'énergie de son logement et par conséquent sa facture de chauffage, 1er poste de consommation énergétique dans l'habitat ancien: Le premier réflexe est de penser au type d'énergie qu'on utilise et de vouloir changer des équipements visiblement vétustes de l'habitation (chaudière, fenêtre...).

Or il est bon de rappeler que l'investissement le plus rentable sera toujours l'isolation thermique.

L'isolation thermique en réduisant les pertes de chaleur minimise les besoins en énergie (demande de chauffage) et réduit donc de fait, à la fois : la facture, la consommation et la pollution jusqu'à 80%. En moyenne, 62% de notre consommation globale est due au chauffage.



Comment réussir l'isolation thermique ?

La réussite d'une isolation thermique repose sur l'isolation de l'ensemble de l'enveloppe de la maison : isolation des murs, des combles et des sols (si envisageable : vide sanitaire accessible, plancher sur local non chauffé), par la mise en œuvre :



1) d'isolants performants, certifiés et d'une résistance thermique suffisante :

La condition d'une isolation performante est d'utiliser des isolants qui offrent la résistance thermique la plus forte. Plus la résistance thermique (R) du système d'isolation est élevée, moins il y aura besoin de consommer de l'énergie.

Il faut choisir à minima les valeurs de performance qui répondent en même temps au crédit d'impôt et au CEE (Certificat d'Economies d'Energie) et /ou la RT, soit :

- en toit R>5 m²K/W
- en mur R>2,8 m²K/W
- en sol R> 2,8 m²K/W

Si l'on cherche à obtenir un bâtiment avec le label Bâtiment Basse Consommation (BBC), il faut augmenter ces résistances thermiques de 1,5 à 2 m²K/W.



Influence de l'épaisseur et du lambda:

La résistance thermique R ($\text{m}^2\cdot\text{K}/\text{W}$) dépend de l'épaisseur (e) et de la conductivité thermique λ (Les isolants thermiques ont des λ inférieurs à 0,060 W/ (m.K)) du matériau : $R = e / \lambda$.

L'épaisseur (e): C'est la hauteur en millimètres de l'isolant posé. A λ égal, plus l'isolant est épais, plus la résistance thermique est forte.

En conclusion : pour évaluer la performance d'un isolant, il faut toujours tenir compte de l'épaisseur et de la conductivité thermique intrinsèque de l'isolant.

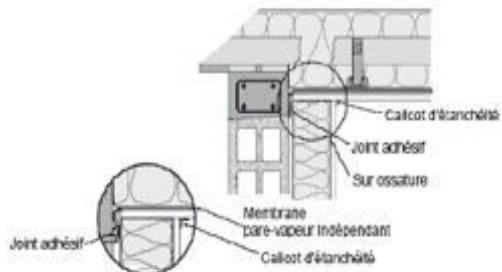
Voici les différents matériaux utilisés dans l'isolation, et leur conductivité thermique:

Produit d'isolation / Performance thermique	Lambda sec à 10°C (λ) * les produits à base végétale et animale ont un lambda utile plus élevé (pour tenir compte de la reprise d'humidité), le lambda ci-dessous doit donc être majoré
Laine de verre	$\lambda = 0.030$ à 0.040
Laine de roche	$\lambda = 0.034$ à 0.040
Laine de chanvre	$\lambda = 0.041$ à 0.044
Polystyrène (PSE)	$\lambda = 0.030$ à 0.038
XPS	$\lambda = 0.029$ à 0.035
Plume de canard	$\lambda = 0.040$ à 0.042
Polyuréthane	$\lambda = 0.021$ à 0.028
Laine de bois	$\lambda = 0.038$ à 0.060
Laine de mouton	$\lambda = 0.039$ à 0.042
Laine de lin	$\lambda = 0.037$ à 0.041
Ouate de cellulose	$\lambda = 0.038$ à 0.040
Laine de coton	$\lambda = 0.039$ à 0.042
Textiles recyclés	$\lambda = 0.039$ à 0.042
Verre cellulaire	$\lambda = 0.042$ à 0.050
Produits minces réfléchissants	Dépend du nombre de couches et de leur nature

2) D'une étanchéité à l'air pour moins de déperditions thermiques du bâti :

L'étanchéité à l'air d'un bâtiment dans son ensemble dépend de la qualité des composants des systèmes, de la mise en œuvre. Une attention toute particulière sera portée notamment sur le traitement des jonctions et de tous les points singuliers de la construction :

- jonction des façades avec les planchers et la toiture, les angles de murs,
 - jonction des façades avec les refends,
 - jonction des façades avec les ouvertures (fenêtres, portes, lucarnes),
 - passage des câbles électriques, des canalisations, des gaines et conduits divers,
 - traitement des boîtiers électriques (prises, interrupteur électrique,
 - traitement des coffres de volets roulants et d'escalier et/ou cave/sous-sol.



3) D'une ventilation maîtrisée pour un air neuf et sain et évacuer les excédents de vapeur d'eau :



Il est conseillé d'installer un système de ventilation performant et « intelligent » : choisir un système facilement utilisable privilégiant une ventilation asservie à l'utilisation, par exemple : une ventilation simple flux hygroréglable, un système asservi à la présence ou à la qualité de l'air (en tertiaire) ou encore un système double flux avec échangeur permettant de récupérer les calories pour réchauffer l'air entrant.

On conclut avec cette comparaison:



Conclusion

Cette étude préalable de notre projet nous a permis de distinguer et d'aborder différents aspects majeurs du problème posé. Nous avons dégagé les grandes thématiques de ce sujet :

- La production énergétique à l'aide des énergies renouvelables sous tous les angles mais principalement l'énergie solaire.
- La situation de production d'électricité globale mais aussi à Grenoble. Ceci va être très important de pouvoir avoir des chiffres utiles pour continuer notre étude.
- Le stockage énergétique. Cette présentation était une présentation générale des moyens de stockage mais il sera indispensable de calculer plus précisément les rendements des solutions que nous allons envisager. Le fait de posséder les chiffres de production électrique va être indispensable dans ce cadre de l'étude.
- Une étude plus précise des panneaux photovoltaïques qui est l'outil sur lequel on se penchera avec attention pour améliorer les rendements dans les futurs bâtiments de Grenoble.



Cependant nous nous sommes aussi penchés sur un problème qui nous semblait crucial et qui est en relation avec le stockage énergétique : l'isolation thermique et les systèmes de chauffage. En effet, dans plusieurs de nos conférences, beaucoup de professionnels du bâtiment nous ont montré à travers plusieurs cas que l'aspect thermique d'un bâtiment était la principale source de perte énergétique. Donc il nous ait apparu important d'étudier cette dimension du problème car si on maximise les rendements, il ne faut pas que tout ce travail soit perdu dans ce « fosse énergétique » qu'est le chauffage.

Tous ces thèmes sont cruciaux dans l'avenir des bâtiments à énergie positive et sont étroitement liés les uns avec les autres. Chaque étude doit se servir des autres pour être cohérent dans un projet global. Et ce n'est pas en optimisant qu'un seul de ces aspects que nous rendrons possible et rentable le bâtiment à énergie positive !

Mais cette étude nous a aussi montré à quel point le solaire est et sera indispensable dans un projet comme celui d'Eiffage. Et la phase « Le bâtiment à énergie positive sera solaire ou ne sera pas » prend enfin tout son sens.

Annexes : Systèmes de chauffage

Chauffage solaire

Comment fonctionne un chauffage solaire:

Le chauffage solaire tire son énergie de panneaux solaires thermiques. Ceux-ci transforment la lumière du soleil en chaleur qui est utilisée pour chauffer l'eau du ballon d'eau chaude (cumulus) et produire de la vapeur d'eau, qui chauffe les radiateurs. Le système de chauffage par capteurs solaires ne suffit souvent pas à atteindre une autonomie énergétique concernant le chauffage d'un logement mais d'après l'ADEME, ces systèmes combinés peuvent soulager de 20 à 40% les dépenses annuelles d'énergie liées au chauffage, selon la région et la taille de l'installation.

Les inconvénients du chauffage solaire

Le chauffage solaire tire partie de l'énergie solaire, qui est une énergie propre et renouvelable. Le seul inconvénient est encore le rendement des panneaux solaires, qui est souvent faible pour des panneaux de bas de gamme. Des panneaux mieux fabriqués seront plus coûteux, même si la production d'énergie, combinée aux aides financières pour supporter leur installation, restera rentable à long terme. L'énergie solaire suffit rarement à atteindre une autonomie énergétique.

Chauffage au bois

Le chauffage au bois peut être utilisé comme chauffage central ou d'appoint. Le bois de chauffage est une matière première renouvelable. Le chauffage au bois peut devenir une source principale de chauffage et avantage d'être neutre en termes de gaz à effet de serre: quand il brûle, le bois rejette uniquement le CO₂ que l'arbre a absorbé pendant sa vie.

Le bois: une énergie locale

La forêt en France a un taux de croissance annuel de 10% et recouvre plus de 28% du territoire, soit plus de 15 millions d'hectares. La production de bois peut donc être abondante en France et couvrir les besoins en bois de chauffage.

Avec quel bois se chauffer ?

Le bois de feu peut se présenter en plusieurs formes : la classique bûche de bois, les granulés (aussi appelés pellets), les briques de bois reconstituées et les plaquettes forestières.

Chauffage aérothermique

Le chauffage aérothermique peut permettre d'économiser jusqu'à 75% de la facture d'énergie liée au chauffage du logement. Le coefficient d'efficacité du chauffage

aérothermique se situe entre 3 et 4. Les dispositifs de chauffage aérothermiques sont très adaptés aux bâtiments anciens puisqu'ils peuvent très facilement être raccordés à un circuit de chauffage déjà en place (radiateurs ou parquets chauffants). Ce type de chauffage utilise une pompe à chaleur pour faire entrer de l'air chaud dans le logement.

Chauffage géothermique

Le chauffage géothermique puise de l'énergie dans le sol via des capteurs enterrés et la restitue sous forme de chauffage dans la maison. Le capteur, situé à moins d'un mètre sous la surface, est plus grand que la surface à chauffer. La chaleur est généralement retransmise directement par un système de parquet chauffant.

Bibliographies

- <http://www.energies-renouvelables.org>
- <http://www.energies-renouvelables.org/observ-er/html/inventaire/pdf/12e-inventaire-Chap01-Fr.pdf>
- <http://www.sunpowercorp.fr/homes/how-to-buy/learn-more/how-solar-works/>
- http://www.fnh.org/francais/doc/en_ligne/energie/intro.htm
- <http://www.toutsurlisolaison.com>
- <http://www.ventes-immobilieres.org/meilleurs-chauffages-ecologiques.html>
- -THESE Présentée A l' UNIVERSITE DE YAOUNDE I pour l'obtention du diplôme de DOCTORAT /Ph.D Spécialité Energétique par Pierre MEUKAM Docteur 3° Cycle sur CARACTERISATION DE MATERIAUX LOCAUX EN VUE DE L'ISOLATION THERMIQUE DE BATIMENTS
- CSTB : <http://www.cstb.fr/actualites/dossiers/vers-des-batiments-a-energie-positive.html>
- « Vous avez dit Bâtiment à énergie positive ? » de Jean-Christophe VISIER (consulté le 12/11/2011)
- Thèse de Stéphane THIERS pour obtenir le grade de Docteur de l'école Nationale Supérieure des Mines de Paris spécialité « Energétique » (réalisée le 21/11/2008)
- Legifrance : www.legifrance.gouv.fr (consulté le 12/11/2011)
- EIA : International Energy Statistics : <http://www.eia.gov> (consulté le 13/11/2011)
- Cahier des charges et la charte d'objectifs de la caserne de bonne
- Debonne-Grenoble : <http://www.debonne-grenoble.fr/index.php?/fr/Les-commerces-et-equipements/Bonne-Energie-C> (consulté le 15/11/2011)
- Concerto : <http://www.concerto-sesac.eu/> (consulté le 15/11/2011)
- NEA : The Nuclear Energy Agency <http://www.oecd-nea.org/nea/> (consulté le 16/11/2011)
- AREVA : l'énergie nucléaire <http://www.areva.com> (consulté le 16/11/2011)
- <http://www.photovoltaïque.info/Les-differentes-technologies.html>
- <http://forums.futura-sciences.com/environnement-developpement-durable-ecologie/120764-lenergie-photovoltaïque-cellule-silicium-amorphe.html>
- http://www.cea.fr/energie/l_hydrogene_les_nouvelles_technologies_de_l_ene#chap3
- <http://www.techno-science.net/?onglet=glossaire&definition=7170>
- <http://www.ines-solaire.com/solpv/page6.html>
- www.pvresources.com/index_photovoltaic.php
- <http://jdedinechin.free.fr/rapports%20étudiants%202011/Cellules%20Gratzel-%20JAMES%20GIRAUT%20MONFORT-doc.pdf>

Thème : Bâtiment à énergie positive

Le bâtiment à énergie positive sera solaire ou ne sera pas : quelles perspectives pour la production et le stockage d'électricité ?

- *Rapport Second - Janvier -*

Équipe TBD10

Abou Saab Christelle
Dutheil Pierre
Galle Virgile
El Jaouhari Adam
Tian Yannick



Référent Pédagogique

Pierre JEHEL

Client Projet
Sarah LAVAUX



Sommaire

Partie 1 : Démarche de définition du livrable

1-1- Petit Flashback au 25 novembre

1-2-Vos conseils

1-3-Démarche pour définir le livrable final

1-3-A- Un plan de gestion des moyens de production et de stockage d'électricité sur une durée donnée

1-3-B- Un histogramme en 3D permettant de savoir quand utiliser un moyen de production ou de stockage

Partie 2 : Energie photovoltaïque

2-1- Un premier paramétrage

2-2- Présentation des calculs et détermination des paramètres

Partie 3 : Energie éolienne

3-1- Description

3-2-Production d'électricité

3-3-Rentabilité et énergie grise

3-4- Exemples

3-5- Application à Grenoble

Partie 4 : Energie hydraulique

4-1-Éléments géographiques

4-2- Éléments techniques

Conclusion

Partie 1 : Démarche de définition du livrable final

1-1- Petit flashback au 25 Novembre

Le 25 Novembre 2011 a eu lieu notre soutenance pédagogique. Cette étude portait sur plusieurs axes différents qui nous semblaient primordiaux à traiter dans le cadre de notre sujet. De plus, ces points nous avaient semblé importants car ils pouvaient s'avérer très utiles dans la suite de notre étude. Enfin nous les avons trouvées par une démarche logique que nous avions eue au cours des premières réunions. Et cette démarche nous vous l'avons exposée au cours de cette soutenance.

Nous avions bien sûr présenté l'équipe, nos méthodes. Nous avions abordé un exemple de BEPOS que nous avions trouvé intéressant. Puis la présentation de la production énergétique mondiale et française avait succédé à la production électrique française et ainsi nous avions posé le décor énergétique français. Il semblait alors important dans l'optique du développement durable de revoir cette production d'électricité sous l'angle des énergies renouvelables: c'est pourquoi nous avons énumérés les différentes énergies renouvelables à notre disposition pour ce projet et leurs caractéristiques. Ceci nous permettait de savoir ce qui existait déjà pour se donner un certain bagage dans ce domaine ; mais ceci pourrait dans le futur nous donner des idées sur d'autres modes de production pas encore envisagés aujourd'hui. Enfin notre projet porte aussi beaucoup sur les moyens de stockage de l'énergie électrique qui sont très peu développés aujourd'hui et il nous a donc demandé beaucoup de recherches pour avoir accès à quelques connaissances sur ces technologies.

En résumé, les points abordés ont été :

- La production d'électricité mondiale
- Les énergies renouvelables et leurs propriétés
- Les moyens de stockage

Cette étude documentaire nous a fait comprendre plusieurs choses importantes sur ce projet :

- Le problème est très complexe car il fait intervenir de nombreux facteurs dont la nature qui est imprévisible
- Les technologies utilisées sont très récentes, il faut donc contacter des entreprises spécialistes dans ce domaine
- La solution que nous allons proposer pour ce projet doit être pragmatique et elle doit être justifiée sous tous les angles

1-2-Vos conseils

Suite à cette soutenance, vous nous avez transmis ce qui allait bien, ce qu'il fallait travailler et ce dont nous allions devoir faire preuve pour la suite de notre projet. C'est dans le but de se servir de ses recommandations que les différentes formes de notre projet ont émergées.

On relève quelques uns de vos conseils :

1- Confronter les différentes sources et la diversité des données : en effet, les sources que nous avions trouvées et celles que nous recherchons encore sont très diverses et parfois incohérentes entre elles. C'est dans une approche réfléchie et en recul que nous allons devoir percevoir notre étude.

2- Représenter les données de manière constructive pour répondre à la problématique posée. C'est ce point en particulier qui nous avait fait défaut lors de la première soutenance. Et, comme vous allez le voir plus loin dans notre pré-étude, c'est selon nous, l'une des valeurs ajoutée que l'on peut avoir dans ce projet. Comme on le sait les données dans ce domaine sont gigantesques ; mais comment peut-on les utiliser de manière efficace.

Qu'a-t-on réellement besoin quand on veut construire un BEPOS à Grenoble ? Comment cela peut-être présenter ? C'est à ces questions que nous avons essayé de répondre en donnant une forme possible à notre livrable dans cette pré-soutenance et qui se révèlera sûrement très utile pour notre projet final.

3- Prendre du recul, porter un regard critique et se positionner.

4- Combiner moyens de stockage et moyens de production (comme des vases communicants) pour avoir le système électrique le plus fiable possible.

Ces deux derniers points sont ceux que nous développeront dans notre livrable final.

1-3- Notre démarche pour définir le livrable final

Dès la fin de notre soutenance, nous avons décidé de prendre plus de recul sur notre projet pour avoir une vue globale du projet. Ceci afin d'avoir un ensemble cohérent et non pas des parties séparées et faisant un tout et pas forcément une unité.

Nous nous sommes donc demandés : Que peut-on attendre lorsqu'on donne un projet similaire au nôtre à des étudiants ? Soit qu'attend-on de nous ? Quelle est la demande ? C'est en répondant précisément à ces questions que le livrable va pouvoir être défini.

Pour nous et en ayant pris en compte les conseils que nous citons précédemment, le projet correspond à un problème de gestion et d'utilisation combinée des moyens de production et de stockage d'énergie. Ainsi c'est dégagé la forme d'un livrable.

1-3-A-Un plan de gestion des moyens de production et de stockage d'électricité sur une durée donnée

Ce plan serait aurait donc la forme suivante :

Pour une durée donnée (par exemple une journée ou un an), il prévoit quelles sources d'électricité fonctionnent, quelles moyens de stockage stockent ... et tout ça sur quelle durée.

Tout ceci peut paraître flou mais voyons un exemple :

Considérons une journée moyenne du mois de Juin. Il est 16h. Sous la forme d'une frise chronologique, on peut voir à 16h ce qui se passe au niveau du réseau électrique. A 16h la demande n'est pas très forte donc certains moyens de stockage (comme des batteries grandeurs humaines ou des salles à air pressurisé) font des stocks pour subvenir à la demande de 19h. Mais avec quelle énergie ? L'électricité est produite à la fois par le photovoltaïque (on est en juin donc ceci est très rentable) et l'usine marémotrice qui est sur la rivière à côté de Grenoble. Mais les éoliennes ne sont pas utilisées car il n'y a pas assez de vent à 16h...

Ceci n'est qu'un exemple, en aucun cas scientifiquement fondé mais juste présenté par intuition. Notre but serait de présenter un plan soutenu par des courbes réelles de production, de demande et de stockage qui rendrait possible l'installation d'un BEPOS à Grenoble. Comme nous l'avons dit précédemment, ce plan pourrait être présenté sous la forme d'une frise chronologique à plusieurs lignes (soit une par moyens de stockage et de production) pour savoir si ce moyen est en service ou non.

Cependant, partir de rien pour faire un plan aussi précis et complexe, ceci est impossible ! C'est la raison pour laquelle nous avons décidé de faire une étape intermédiaire dans notre étude qui nous semble être un outil très utile pour la suite du projet.

En conclusion, un livrable idéal serait cette frise chronologique tracée pour chaque instant de l'année pour notre quartier à Grenoble. Cependant, même avec ce que nous allons proposer, ce plan risque de se révéler trop ambitieux et trop long à réaliser.

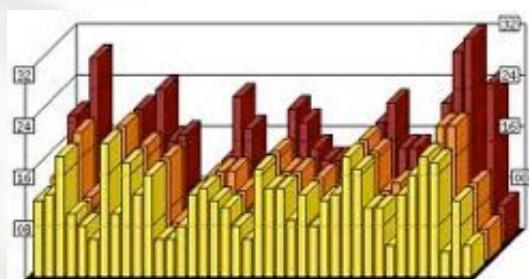
1-3-B- Un histogramme en 3D permettant de savoir quand utiliser un moyen de production ou de stockage

C'est le conseil de « représenter les données pour répondre à la problématique » qui nous a suggéré cette idée. En effet, nous avons ici un problème complexe avec un flot de données. Pour répondre et créer la frise dont nous avons parlé précédemment et qui serait l'outil final pour Eiffage en ce qui concerne la gestion du réseau électrique, il nous faut des informations sur chaque moyen de production et de stockage. Et pour un moyen de production, une seule donnée nous intéresse : sa production à un moment donné ! Nous nous sommes donc dit que les diagrammes que nous allons essayer de créer seront très utiles pour l'avancement du projet.

En quoi consistent ces diagrammes 3D ?

Pour chaque mois de l'année (mis sur l'axe x), on dispose d'un « jour moyen » où pour chaque heure (mis sur l'axe y), on donne la production du moyen de production considéré (mis sur l'axe z)

Par exemple ici avec 3 mois :



Comment compte-t-on les réaliser ?

Pour chaque moyen de production, on liste les facteurs qui jouent sur sa production, on choisit ceux à prendre en compte, on récolte les données et on réalise le diagramme.

Ce processus étant un peu fastidieux à faire à chaque fois, nous comptions réaliser un programme qui permettrait de rentrer les tableaux de données dont on a besoin et qui sortirait le diagramme 3D. Un tel programme serait aussi utile dans le sens où l'on pourrait rajouter des paramètres pour avoir un diagramme plus précis sans trop de grandes difficultés.

Avantages :

- C'est une méthode et elle est très facilement reproductible pour les autres types d'énergies
- On peut combiner facilement les diagrammes en les superposant

- On peut intégrer le stockage à notre étude de manière plus simple qu'avec seulement des rendements
- Si on arrive à créer une telle courbe pour la demande en électricité à Grenoble, elle facilite la comparaison entre la production, à la demande et au stockage
- C'est donc une bonne avance vers notre livrable !

Inconvénients :

- Le modèle n'est pas assez précis pour établir heure par heure le plan de gestion du réseau électrique annuel
- Les paramètres qu'on prend en compte ne sont peut-être pas suffisants ou trop nombreux
- Les données à avoir sont très très nombreuses !! De plus, pour avoir un jour moyen par mois, il faut corréler toutes les données sur tout un mois. Comment faire ?

Partie 2 : L'énergie photovoltaïque

Le but est de déterminer les différents paramètres à prendre en compte lors du calcul fournissant la courbe.

2-1- Un premier paramétrage

Les paramètres intervenants dans la captation d'énergie par un capteur solaire sont (liste non exhaustive) :

- La durée d'ensoleillement
- Le rendement de l'installation électrique support
- L'intensité lumineuse
- Le rendement du panneau (transformation énergie de rayonnement \Rightarrow énergie électrique)
- Son seuil (énergie maximale qu'il peut fournir et au delà duquel il sature)
- L'orientation Nord---Sud---Est---Ouest
- L'inclinaison
- Le type de panneau
- Les matériaux semi---conducteurs utilisés
- La forme du panneau solaire
- Les effets climatiques (température, couverture nuageuse)

Un tri est à effectuer parmi ces paramètres afin d'éviter les redondances et les données inutiles. Rappelons que le calcul est censé fournir la production d'énergie électrique d'une installation photovoltaïque.

Premièrement, on peut remarquer que le type de panneau ainsi que le matériau semi---conducteur utilisé sont pris en compte lorsque l'on considère le taux de conversion du panneau. Ce sont des facteurs à éliminer.

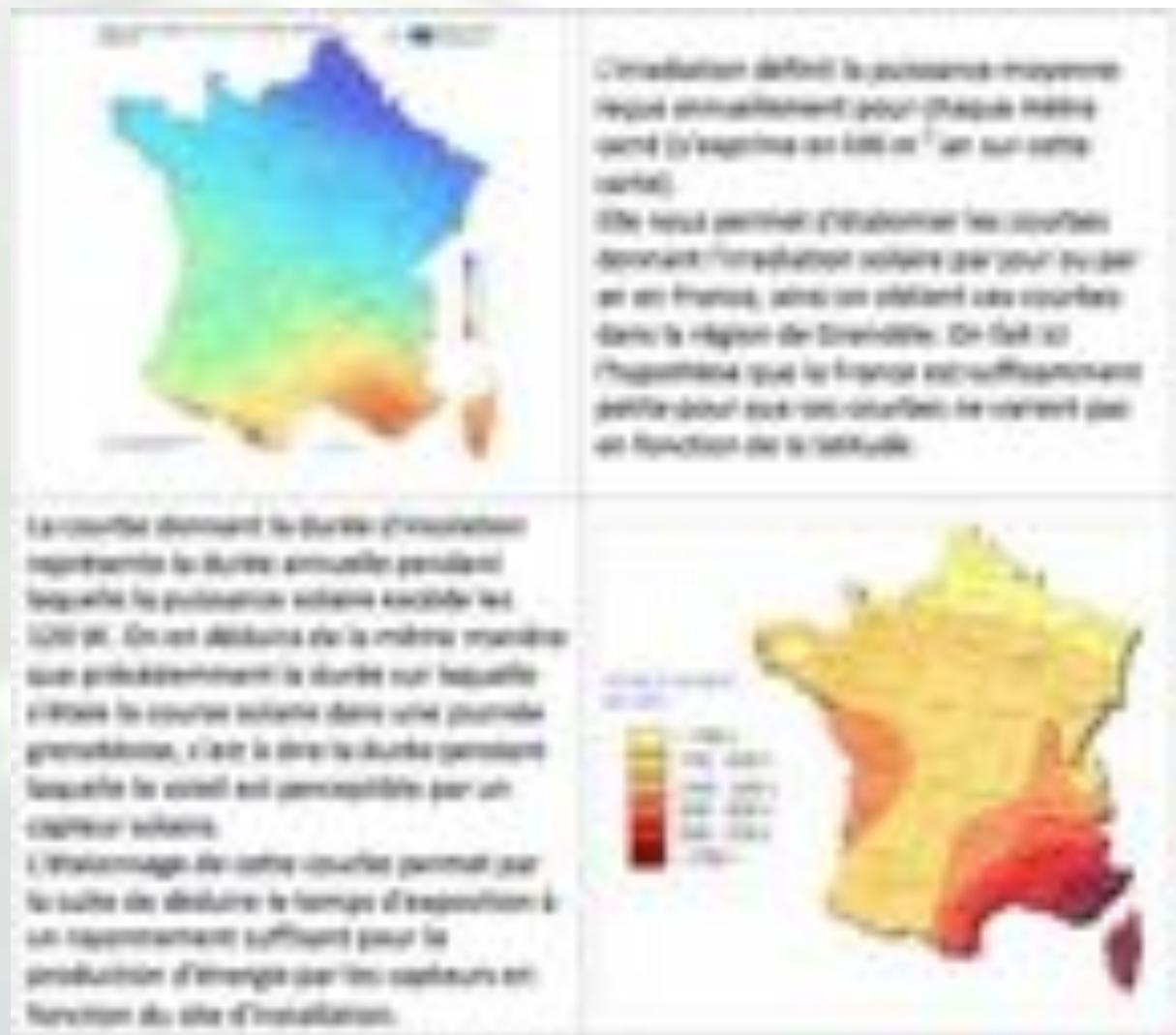
D'autre part, la forme des panneaux importe peu, seule compte la superficie de l'installation. On peut donc remplacer ce critère.

Il s'avère que les autres paramètres sont essentiels, nous les présenterons donc au cours de la présentation des méthodes de calcul envisagées.

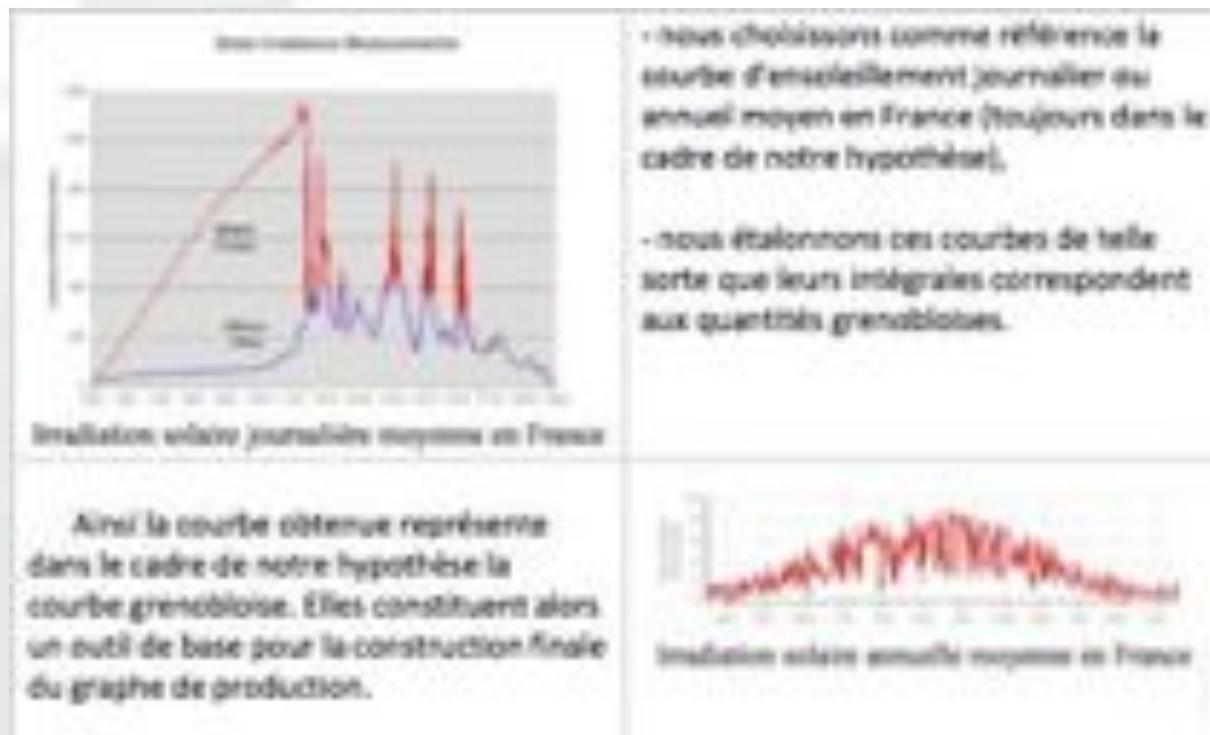
2-2- Présentation des méthodes de calculs et détermination des paramètres

2-2-1- Intensité lumineuse perçue et durée d'ensoleillement

Le gisement solaire en France est décrit par les cartes donnant la durée d'insolation journalière et celle donnant l'irradiation journalière.



En ce qui concerne la puissance « solaire » perçue par l'installation, le principe de notre calcul est le suivant :

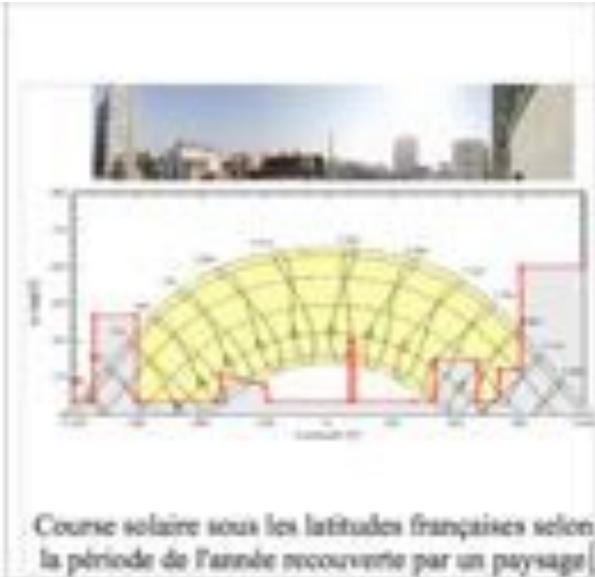


Ainsi la courbe obtenue représente dans le cadre de notre hypothèse la courbe grenobloise. Elles constituent alors un outil de base pour la construction finale du graphique de production.



Pour ce qui est de la durée d'ensoleillement, on procède de même avec la courbe représentant la course solaire.

Puis dans le but de déterminer le réel temps d'exposition sur le lieu même de l'installation photovoltaïque, on lui superpose un « masque ». Ainsi il suffit de mesurer graphiquement cette durée : en mesurant la partie non masquée de la course.



Nous possédons alors les informations de durée et d'intensité d'irradiation du site à rentrer en paramètres.

2-2-2-Facteurs météorologiques

La prise en compte des facteurs météorologiques est réalisée lorsque les moyennes ont été réalisées pour former les courbes précédentes.

2-2-3- Orientation

En ce qui concerne l'orientation des panneaux solaires, diverses données récoltées ont permis de réaliser le tableau suivant :

Inclinaison	0°	30°	60°	90°
Sud	93,00%	100,00%	91,00%	68,00%
Sud-Est / Sud-Ouest	93,00%	96,00%	88,00%	66,00%
Est / Ouest	93,00%	90,00%	78,00%	55,00%

2-2-4- Les autres facteurs

Les autres facteurs sont assez aisés à prendre en compte.

Partie 3 : Energie Eolienne

3-1- Description

Une éolienne se caractérise principalement par :

- sa puissance nominale;
- le diamètre de son rotor;
- la hauteur de son mât.



3-2- Production d'électricité



Puissance du vent contenue dans un cylindre de section S

$$P_{cinétique} = \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot S \cdot V^3$$

ρ : Masse volumique de l'air (air atmosphérique sec, environ : 1,23 kg/m³ à 15 °C et à pression atmosphérique 1,0132 bar)

S : surface du capteur éolien (en m²)

V : vitesse du vent (en m/s)

Cette puissance est une puissance théorique, il est bien sûr impossible qu'elle soit récupérée tel quelle par une éolienne (cela reviendrait à arrêter le vent). En pratique, une éolienne dévie le vent avant qu'il atteigne la surface balayée par le rotor. Une éolienne ne pourra donc jamais récupérer l'énergie totale fournie par le vent.

Limite de Betz/Formule de Betz

La puissance récupérable est inférieure, puisque l'air doit conserver une énergie cinétique résiduelle pour qu'il subsiste un écoulement.

La puissance maximale récupérable

$$P_{max} = \frac{16}{27} \cdot P_{cinétique} = \frac{8}{27} \cdot \rho \cdot S \cdot V^3$$

$$\text{Avec } P_{cinétique} = \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot S \cdot V^3 \quad \text{lorsque } V_{aval} = \frac{1}{3} V_{amont}$$

ρ : Masse volumique du fluide (air atmosphérique sec, environ : 1,23 kg/m³ à 15 °C et à pression atmosphérique 1,0132 bar)

S : surface du capteur éolien (en m²)

V : vitesse incidente (amont) du fluide (en m/s)

Dans le cas d'une hélice de diamètre D, la limite de Betz est égale à :

$$P = 0,37 \cdot \frac{\pi}{4} \cdot D^2 \cdot V^3$$

$$P = 0,29 \cdot D^2 \cdot V^3$$

Remarquons que le nombre de pales sur une éolienne n'influence pas sa production électrique. C'est la surface balayée par l'hélice qui compte. Ainsi deux grandes pales feront tout à fait aussi bien que trois pales.

Il faut que l'éolienne soit haute pour qu'elle puisse profiter au maximum du vent. Ceci nécessite une tour toujours élevée par rapport à la taille de l'éolienne. Une petite éolienne va être installée à 18 mètres de hauteur. Une grande éolienne s'élèvera à plus de 30 mètres.

3-3- Rentabilité et énergie grise

Le coût d'une éolienne ne consiste pas seulement en l'achat de l'éolienne: le coût de l'installation est d'autant plus important que celle-ci est complexe, ce qui revient notamment au transport des matériaux et au montage de l'éolienne, travaux plus difficiles et donc plus coûteux si la taille de l'éolienne est importante.

Type d'éolienne	Production	Prix
Petite éolienne	500 W	entre 750€ et 1 500€
Petite éolienne	2 kW	≈ 6 000€
Eolienne domestique ou rurale	10 kW	≈ 25 000€
Grande éolienne	750 kW	≈ 55 000€

Comme de nombreux produits industriels, plus la production d'éoliennes est importante, moins le prix unitaire de l'éolienne est important. En pratique, on considère qu'une bonne éolienne de série peut atteindre 15 ans de services, bien que ses pales aient pu être changées pendant cette période.

Rendements

L'énergie fournie par l'aérogénérateur étant toujours transformée, cette limite est donc affectée par tous les rendements propres aux différentes transformations.

- Hélice : $0,20 < \eta < 0,85$
- Le multiplicateur ou le réducteur : $0,7 < \eta < 0,98$
- L'alternateur ou la génératrice continue : $0,80 < \eta < 0,98$
- Le transformateur : $0,85 < \eta < 0,98$

- Le redresseur : $0,9 < \eta < 0,98$
- Les batteries : $0,7 < \eta < 0,8$
- Les pertes de lignes : $0,9 < \eta < 0,99$

Les rendements de chaque élément varie avec le régime de fonctionnement lié à la vitesse de rotation de l'hélice, ce qui en dehors du régime nominal diminue encore le rendement global du dispositif, il semble difficile de dépasser 70% de la limite de Betz.

3-4- Exemples

3-4-1- Une éolienne (à axe horizontale) Aircon A10S d'une puissance nominale de 12.2 kW balaye une surface de 44m². On a besoin à une vitesse de vent de 12 m/s, 3.6m² pour créer une force de 1 kW.

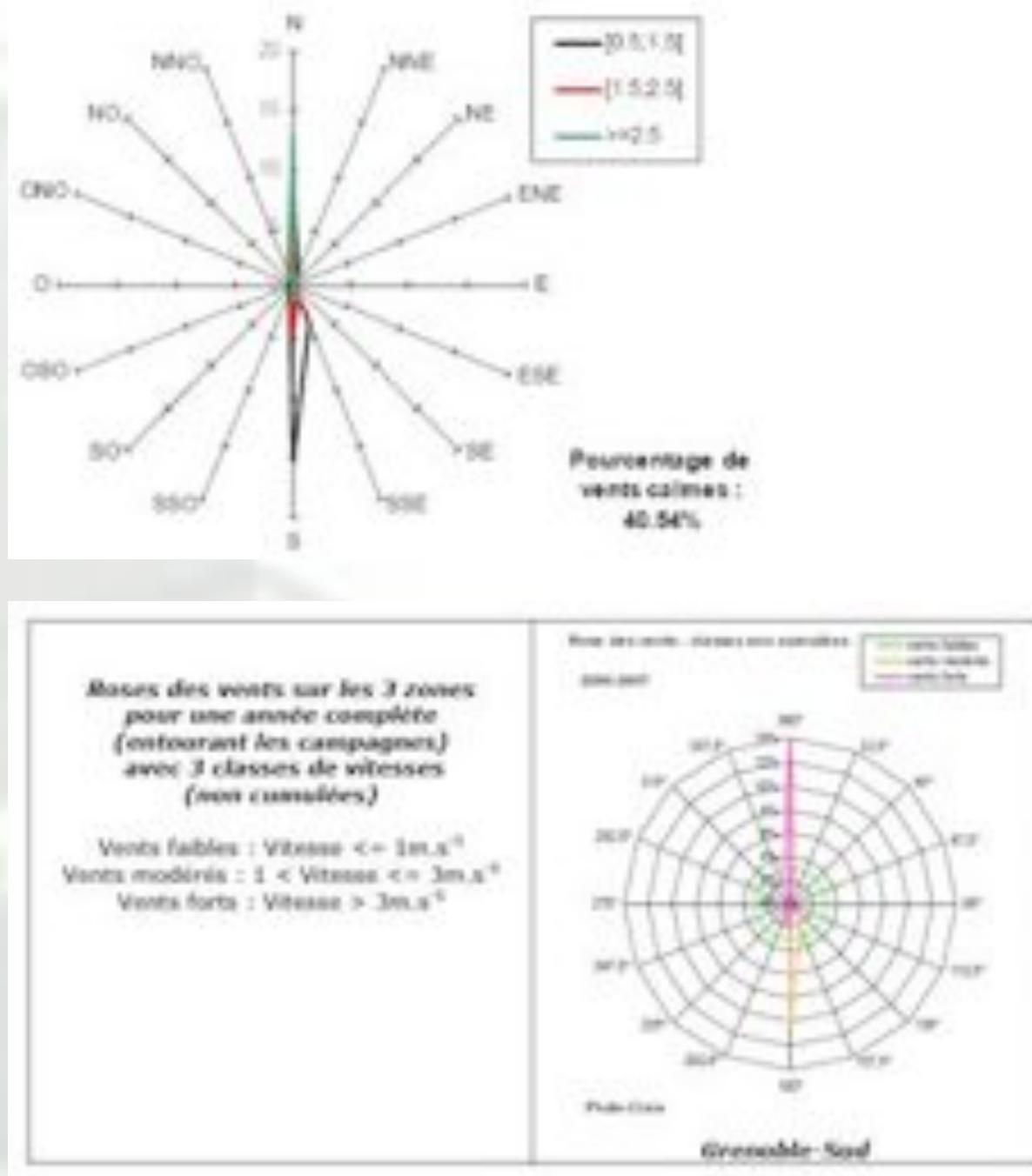
3-4-2- Un exemple d'éolienne ENERCON E82



Données techniques	
Puissance nominale :	2.000 kW
Diamètre du rotor :	82 m
Hauteur du moyeu :	70 –138m
Rotor	
Sens de rotation :	Sens des aiguilles d'une montre
Nombre de pales :	3
Surface balayée :	5.281 m ²
Nombre de rotations :	Variable, 6 à 19,5 tours/mn

3-5- Application à Grenoble : Vitesse du vent

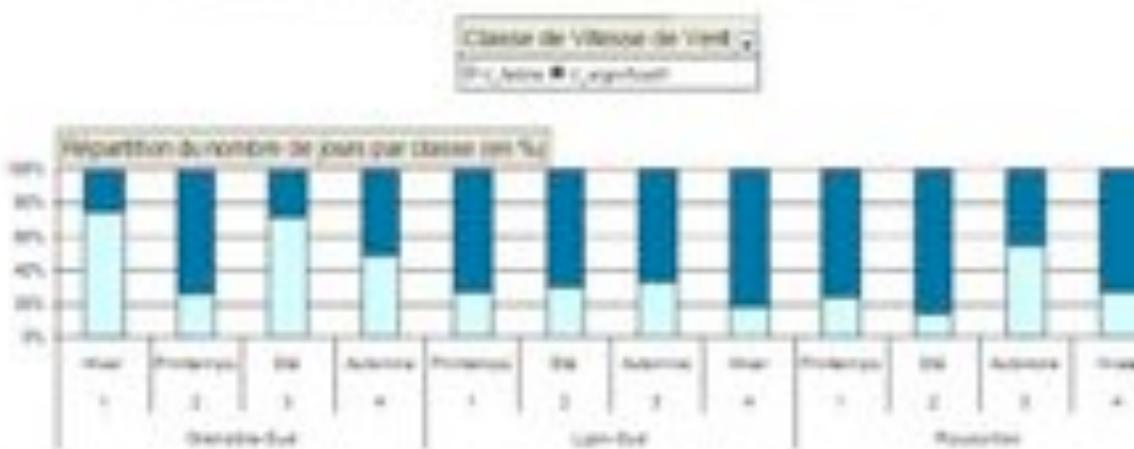
Deuxième rose des vents pour Grenoble Sud (Pont de Claix) mesurée en 2006-2007 par l'ASCOPARG :



D'après cette rose des vents, il y a environ 50% de vents faibles inférieurs à 1 m/s (les directions n'étant pas définies. elles sont à priori également réparties sur les 16 directions retenues pour cette rose des vents), 30% de vents modérés (de 1 à 3 m/s) et 20% de vents forts (supérieurs à 3 m/s).

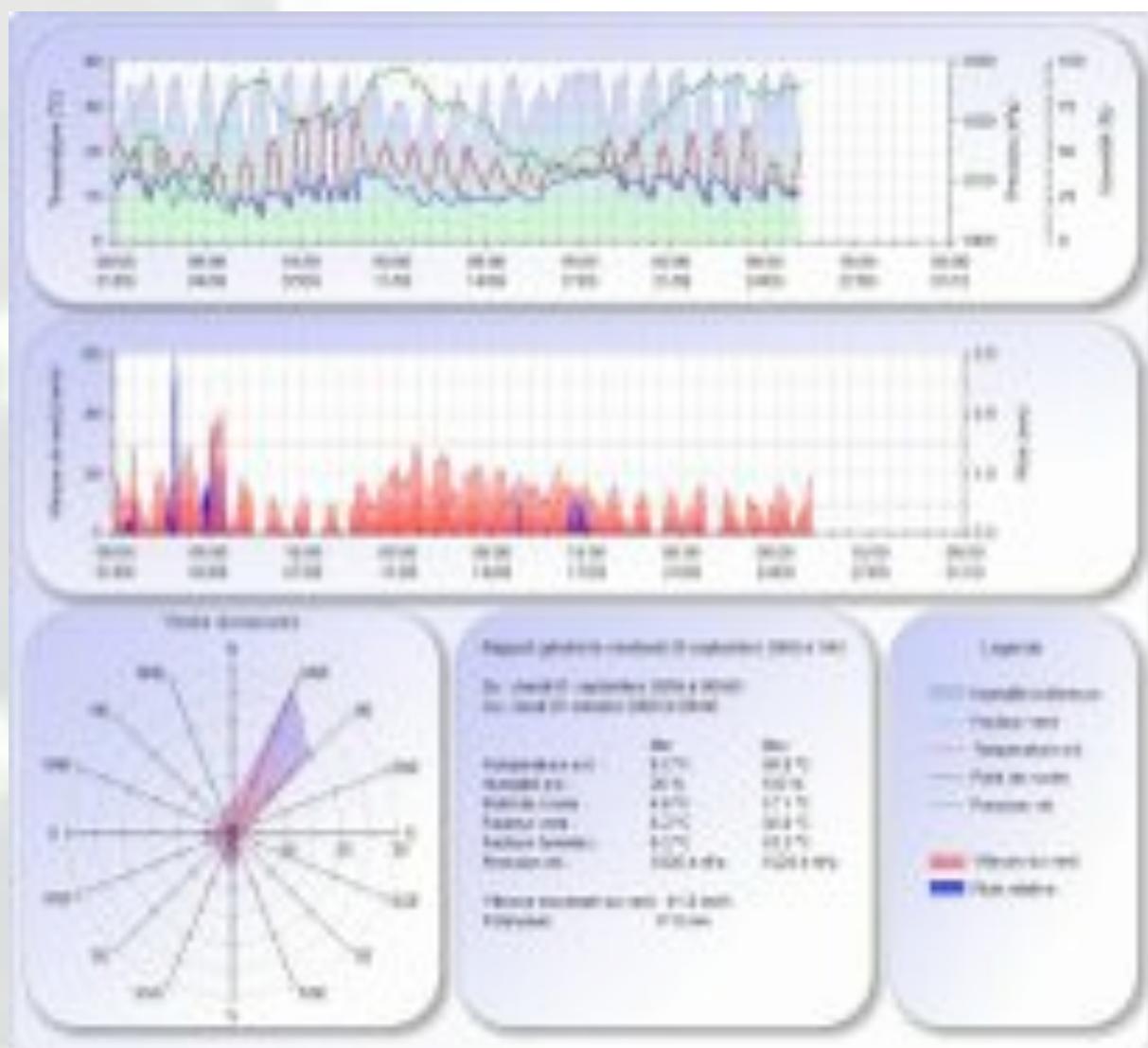
Planche 5 : Vents à Grenoble-Sud, Lyon-Sud et Roussillon en fonction des saisons
Cette planche établie par l'ASCOPARG montre que les vents faibles (<1m/s) sont très majoritaires en hiver et en été à Grenoble Sud (dont Pont de Claix).

Vitesses de vent par zone et en fonction des saisons



Commentaires :

Zone de « Grenoble-Sud » : les vitesses de vents ont été faibles la majorité du temps, à l'exception du printemps ; ceci est lié en grande partie au relief important de cette zone d'étude, située dans le sud du « Y grenoblois ».



3-6- Conclusion de la partie 3

On peut donc dire que l'exploitation de l'énergie éolienne ne sera pas vraiment efficace et rentable à Grenoble. En effet, la vitesse du vent ne dépasse les 5 m.s⁻¹ à cette région, or la production d'électricité nécessite une vitesse de l'ordre de 10m.s⁻¹. A cet argument, s'ajoute le coût élevé d'énergie grise pour l'installation de ces éoliennes.

Partie 4 : L'énergie hydraulique

Introduction

À l'image des moulins à eau de jadis, l'hydroélectricité ou production d'électricité par captage de l'eau est apparue au milieu du XIXe siècle. L'eau fait tourner une turbine qui entraîne un générateur électrique qui injecte les Kilowattheures sur le réseau.

L'énergie hydraulique représente 19% de la production totale d'électricité dans le monde et 13% en France. C'est la source d'énergie renouvelable la plus utilisée. Cependant, tout le potentiel hydroélectrique mondial n'est pas encore exploité.

Il existe deux grands types d'énergie hydraulique : les énergies marines (énergie des vagues, des courants marins, des marées..) et l'énergie hydraulique provenant du débit d'un cours d'eau (les barrages) ou de la hauteur d'une chute d'eau.

- Les énergies marines:

Ce type d'énergie hydraulique se base sur l'énergie marémotrice qui peut être captée par les hydroliennes. Les hydroliennes sont des turbines sous-marines qui, pour produire de l'électricité, utilisent l'énergie cinétique des courants marins. L'énergie hydraulique est alors convertie en énergie mécanique et ensuite en énergie électrique grâce à un alternateur.

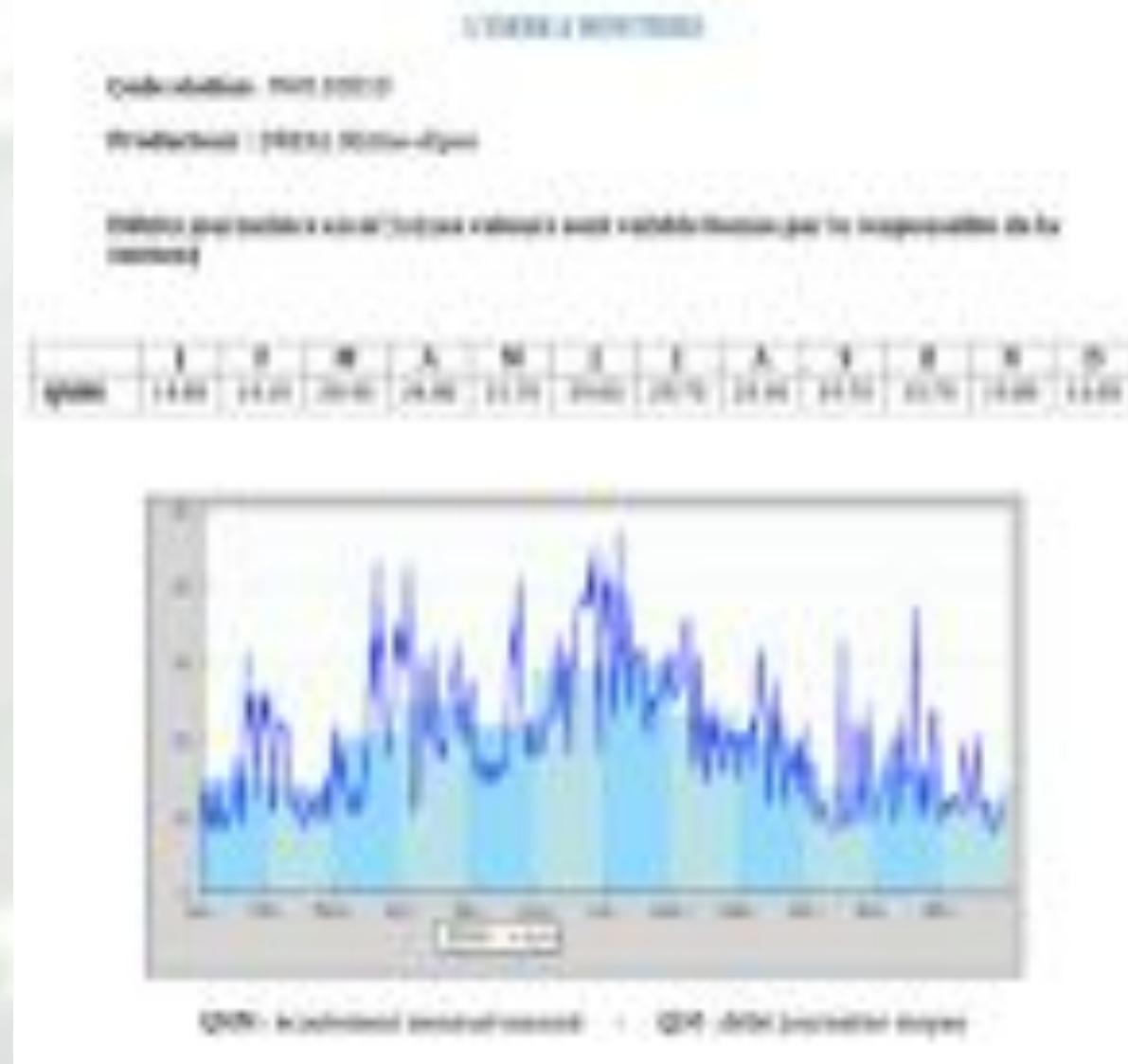
-L'énergie hydraulique provenant des cours d'eau:

Des turbines sont tournés par l'eau issue des cours d'eau ou des chutes d'eau afin qu'un générateur électrique puisse injecter de l'électricité sur le réseau électrique. Ensuite, cette énergie est transformée en énergie électrique au sein d'une centrale électrique.

Nous nous intéresserons au deuxième type, car c'est lui qui semble le plus profitable dans la région de Grenoble. En effet, Grenoble est bâtie sur la plaine alluviale de deux rivières importantes: Le Drac, ayant une longueur d'environ 150 km, ce torrent alpin naît dans les montagnes du Champsaur (Hautes-Alpes), dans le parc naturel régional des Écrins. Et l'Isère, née à 3000m au col de l'Iseron, dans la région Rhône-Alpes.

4-1- Eléments géographiques

Ci-dessous les mesures de débits faites par des stations hydrauliques en 2007:



Kontrollgruppe

Wiederholungen: 4000

Mean: 111.90±0.01

SD: 2.85±0.01 mm

Min: 108.00 mm

Stimulus Gruppe

Mean: 114.34±0.01

SD: 2.91±0.01 mm

3.3 Differenzialanalyse

Kontrollgruppe: P04K000

Stimulus Gruppe

Stimulusgruppen unterscheiden sich nicht in Bezug auf die mittleren Reaktionsschwelle für Pausen (F(1,10) = 0.004)

Stimulus	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30	31	32	33	34	35	36	37	38	39	40	41	42	43	44	45	46	47	48	49	50	51	52	53	54	55	56	57	58	59	60	61	62	63	64	65	66	67	68	69	70	71	72	73	74	75	76	77	78	79	80	81	82	83	84	85	86	87	88	89	90	91	92	93	94	95	96	97	98	99	100	101	102	103	104	105	106	107	108	109	110	111	112	113	114	115	116	117	118	119	120	121	122	123	124	125	126	127	128	129	130	131	132	133	134	135	136	137	138	139	140	141	142	143	144	145	146	147	148	149	150	151	152	153	154	155	156	157	158	159	160	161	162	163	164	165	166	167	168	169	170	171	172	173	174	175	176	177	178	179	180	181	182	183	184	185	186	187	188	189	190	191	192	193	194	195	196	197	198	199	200	201	202	203	204	205	206	207	208	209	210	211	212	213	214	215	216	217	218	219	220	221	222	223	224	225	226	227	228	229	230	231	232	233	234	235	236	237	238	239	240	241	242	243	244	245	246	247	248	249	250	251	252	253	254	255	256	257	258	259	260	261	262	263	264	265	266	267	268	269	270	271	272	273	274	275	276	277	278	279	280	281	282	283	284	285	286	287	288	289	290	291	292	293	294	295	296	297	298	299	300	301	302	303	304	305	306	307	308	309	310	311	312	313	314	315	316	317	318	319	320	321	322	323	324	325	326	327	328	329	330	331	332	333	334	335	336	337	338	339	340	341	342	343	344	345	346	347	348	349	350	351	352	353	354	355	356	357	358	359	360	361	362	363	364	365	366	367	368	369	370	371	372	373	374	375	376	377	378	379	380	381	382	383	384	385	386	387	388	389	390	391	392	393	394	395	396	397	398	399	400	401	402	403	404	405	406	407	408	409	410	411	412	413	414	415	416	417	418	419	420	421	422	423	424	425	426	427	428	429	430	431	432	433	434	435	436	437	438	439	440	441	442	443	444	445	446	447	448	449	450	451	452	453	454	455	456	457	458	459	460	461	462	463	464	465	466	467	468	469	470	471	472	473	474	475	476	477	478	479	480	481	482	483	484	485	486	487	488	489	490	491	492	493	494	495	496	497	498	499	500	501	502	503	504	505	506	507	508	509	510	511	512	513	514	515	516	517	518	519	520	521	522	523	524	525	526	527	528	529	530	531	532	533	534	535	536	537	538	539	540	541	542	543	544	545	546	547	548	549	550	551	552	553	554	555	556	557	558	559	560	561	562	563	564	565	566	567	568	569	570	571	572	573	574	575	576	577	578	579	580	581	582	583	584	585	586	587	588	589	590	591	592	593	594	595	596	597	598	599	600	601	602	603	604	605	606	607	608	609	610	611	612	613	614	615	616	617	618	619	620	621	622	623	624	625	626	627	628	629	630	631	632	633	634	635	636	637	638	639	640	641	642	643	644	645	646	647	648	649	650	651	652	653	654	655	656	657	658	659	660	661	662	663	664	665	666	667	668	669	670	671	672	673	674	675	676	677	678	679	680	681	682	683	684	685	686	687	688	689	690	691	692	693	694	695	696	697	698	699	700	701	702	703	704	705	706	707	708	709	710	711	712	713	714	715	716	717	718	719	720	721	722	723	724	725	726	727	728	729	730	731	732	733	734	735	736	737	738	739	740	741	742	743	744	745	746	747	748	749	750	751	752	753	754	755	756	757	758	759	760	761	762	763	764	765	766	767	768	769	770	771	772	773	774	775	776	777	778	779	780	781	782	783	784	785	786	787	788	789	790	791	792	793	794	795	796	797	798	799	800	801	802	803	804	805	806	807	808	809	810	811	812	813	814	815	816	817	818	819	820	821	822	823	824	825	826	827	828	829	830	831	832	833	834	835	836	837	838	839	840	841	842	843	844	845	846	847	848	849	850	851	852	853	854	855	856	857	858	859	860	861	862	863	864	865	866	867	868	869	870	871	872	873	874	875	876	877	878	879	880	881	882	883	884	885	886	887	888	889	890	891	892	893	894	895	896	897	898	899	900	901	902	903	904	905	906	907	908	909	910	911	912	913	914	915	916	917	918	919	920	921	922	923	924	925	926	927	928	929	930	931	932	933	934	935	936	937	938	939	940	941	942	943	944	945	946	947	948	949	950	951	952	953	954	955	956	957	958	959	960	961	962	963	964	965	966	967	968	969	970	971	972	973	974	975	976	977	978	979	980	981	982	983	984	985	986	987	988	989	990	991	992	993	994	995	996	997	998	999	1000	1001	1002	1003	1004	1005	1006	1007	1008	1009	10010	10011	10012	10013	10014	10015	10016	10017	10018	10019	10020	10021	10022	10023	10024	10025	10026	10027	10028	10029	10030	10031	10032	10033	10034	10035	10036	10037	10038	10039	10040	10041	10042	10043	10044	10045	10046	10047	10048	10049	10050	10051	10052	10053	10054	10055	10056	10057	10058	10059	10060	10061	10062	10063	10064	10065	10066	10067	10068	10069	10070	10071	10072	10073	10074	10075	10076	10077	10078	10079	10080	10081	10082	10083	10084	10085	10086	10087	10088	10089	10090	10091	10092	10093	10094	10095	10096	10097	10098	10099	100100	100101	100102	100103	100104	100105	100106	100107	100108	100109	100110	100111	100112	100113	100114	100115	100116	100117	100118	100119	100120	100121	100122	100123	100124	100125	100126	100127	100128	100129	100130	100131	100132	100133	100134	100135	100136	100137	100138	100139	100140	100141	100142	100143	100144	100145	100146	100147	100148	100149	100150	100151	100152	100153	100154	100155	100156	100157	100158	100159	100160	100161	100162	100163	100164	100165	100166	100167	100168	100169	100170	100171	100172	100173	100174	100175	100176	100177	100178	100179	100180	100181	100182	100183	100184	100185	100186	100187	100188	100189	100190	100191	100192	100193	100194	100195	100196	100197	100198	100199	100200	100201	100202	100203	100204	100205	100206	100207	100208	100209	100210	100211	100212	100213	100214	100215	100216	100217	100218	100219	100220	100221	100222	100223	100224	100225	100226	100227	100228	100229	100230	100231	100232	100233	100234	100235	100236	100237	100238	100239	100240	100241	100242	100243	100244	100245	100246	100247	100248	100249	100250	100251	100252	100253	100254

Statistiques

écoulement annuel :

débit moyen : $67.40 \text{ m}^3/\text{s}$

débit moyen spécifique : 19.60 l/s/km^2

laune d'eau : 617.0 mm

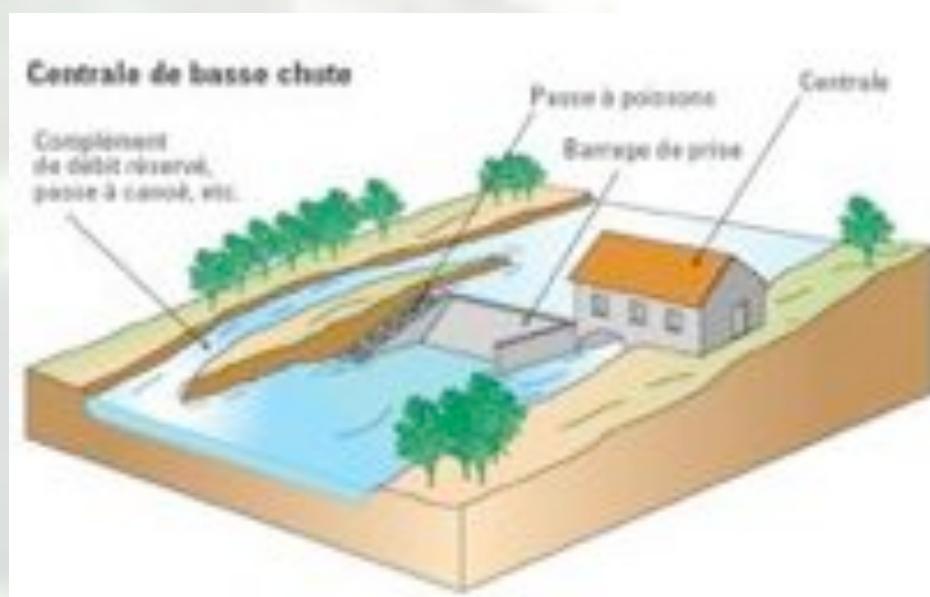
maximum instantané :

débit : $283.0 \text{ m}^3/\text{s}$

Conclusion: On voit bien que le Drac est une rivière torrentielle, à cause de son débit très élevé. Ceci la rend très favorable pour la construction des équipements hydroélectriques, ce qui est déjà le cas pour les centrales de Champ-sur-Drac et de Saint-Georges-de-Commiers, la digue de Notre-Dame-de-Commiers et le barrage de Monteynard.

4-2-Elément techniques

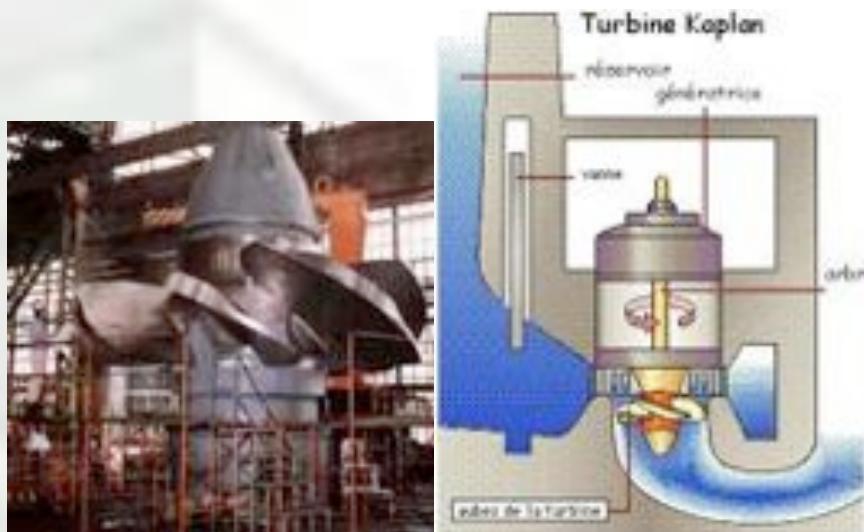
La quantité d'énergie que l'on peut produire dépend de la hauteur de la chute et du débit que l'on peut « turbiner ». Une chute de 1 m avec un débit de 100 l/s peut dégager un 1 kW soit 24 kWh/jour.



Le coût d'une telle installation va de 15 000 € à 40 000 € HT sur un petit moulin 15 kW jusqu'à 400 000 € pour une centrale de 500 kW de puissance. Le génie civil engendre le plus de frais, d'où l'importance du choix du site en fonction de l'état du barrage.
Le retour sur investissement est estimé entre 5 et 10 ans.

Voici les différents types de turbines utilisées pour ce genre de barrages:

a. Turbine Kaplan:



Hauteur de chute: 0 - 30 mètres
Débit 1 - 350 m³/s

Les turbines axiales regroupent les Kaplan, les bulbes et les hélices (turbines à réaction). La turbine Kaplan est une turbine hélice à pales mobiles. Cela permet un meilleur fonctionnement de la turbine sur une plus grande gamme de débits. De multiples possibilités d'installations existent en fonction de l'aménagement ces machines sont peu sensibles aux variations de débit. Leur niveau de rendement mécanique est de l'ordre de 92 % en petite hydraulique. Sachant que le rendement est $ht = P_{mec}/Phyd$

b. Turbine Francis:

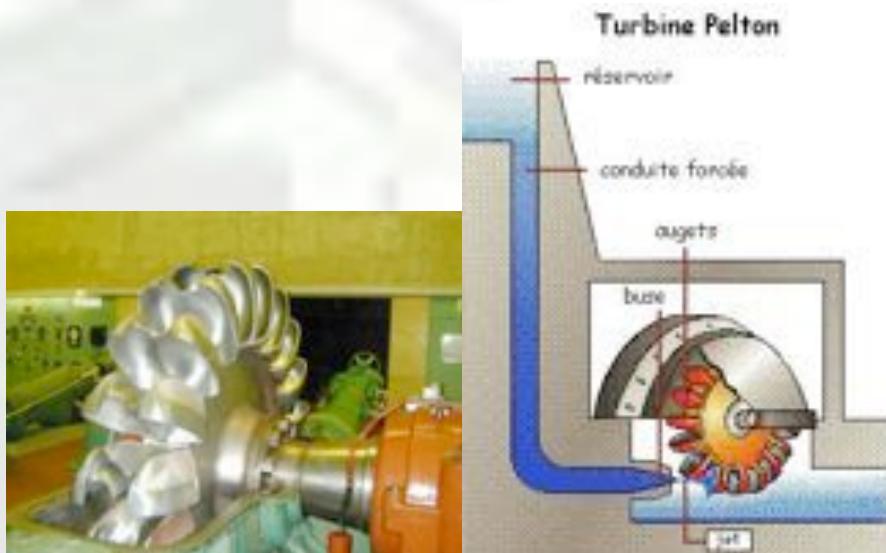


Hauteur de chute: 10 - 700 mètres
Débit: 4 - 55 m³/s

Comme la turbine Kaplan, la Francis est une machine à réaction. Sa roue est immergée et elle exploite aussi bien la vitesse de l'eau (énergie cinétique) qu'une différence de pression. Ce type de turbines se rencontre régulièrement dans les vieux aménagements basse chute (moins de 10 m) où elles sont généralement à chambre d'eau, c'est à dire sans

bâche spirale. Leurs vitesses de rotation étant très lentes et leur adaptabilité aux variations de débit étant relativement mauvaise, elles ont été remplacées par les petites Kaplan, arrivées sur le marché dans les années 1930-1940.

c. Turbine Pelton:



Hauteur de chute: 200 - 2000 mètres

Débit: 4 - 15 m³/s

Ce type de turbine convient particulièrement bien aux applications hautes chute à débit variable, son rendement étant peu sensible à sa variation. Les petites turbines Pelton peuvent atteindre un rendement mécanique à l'accouplement de 90%.

d. La turbine Banki :



Elle est également appelée Cross---flow turbine ou encore turbine Mitchell. Le nom Cross---flow (débit traversant en anglais) vient du fait que l'eau traverse la roue. L'eau actionne les ailettes à la fois à l'entrée et à la sortie de la roue. Cette turbine peut fonctionner sous une large gamme de débits et de hauteurs. Cette turbine est adaptée pour les hauteurs de chute de 1 à 200 mètres, et pour les débits de 20 à 10 000 litres par seconde. Vitesse de rotation : varie de 50 à 2000 tours par minute. La production est inférieure à 1000 kW, mais elle a un rendement à 0,82.

e. Turbines à hélices:



Elle est constituée d'une hélice à pales fixes dont l'axe est parallèle au flux. Elle est bien adaptée aux basses chutes. Elle ne dispose pas de distributeurs pour les petites puissances.

f. Le groupe bulbe :



Elle est constituée d'une turbine Kaplan et d'un alternateur constituant un ensemble entouré par le courant d'eau. L'alternateur est contenu dans un bulbe métallique fermé. Cet ensemble tourne autour d'un axe horizontal dans une conduite de diamètre légèrement supérieur à celui du cercle balayé par la roue. Ce groupe permet de faire des économies importantes. La première a été conçue en Allemagne dans les années 1940.

Conclusion de la partie 4:

Il ne reste qu'à faire une étude approfondie pour trouver le système le plus favorable pour chacune des deux rivières, l'Isère et le Drac. Et en sachant que Grenoble est une ville bâtie sur une plateforme des plus plates en Europe, on optera pour des systèmes de basses chutes.

Conclusion

Dans ce rapport, nous vous avons exposé notre démarche pour essayer de trouver un livrable qui serait le plus utile pour Eiffage. Puis pour donner une idée de ce qui sera un premier livrable (les graphes 3D), les paragraphes suivant expliquent la méthode que nous voulons utiliser pour réaliser ces courbes qui auront une utilisation importante dans la suite du projet.

Thème : Bâtiment à énergie positive

Quelles perspectives pour la production et le stockage d'électricité ?

- Rapport 3 - Mars -

Équipe TBD10

Abou Saab Christelle
Dutheil Pierre
Galle Virgile
El Jaouhari Adam
Tian Yannick



Référent Pédagogique

Pierre JEHEL

Client Projet

Sarah LAVAUX



PLAN

PARTIE 1 - ETAT D'AVANCEMENT DU PROJET

- 1-1- Respect du planning
- 1-2- Répartition des taches
- 1-3- But recherché par l'équipe
- 1-4- Problèmes résolus et à résoudre

PARTIE 2 – TECHNOLOGIE PHOTOVOLTAÏQUE

- 2-1- Le Silicium Cristallin
- 2-2- Les couches minces
- 2-3- Les Technologies innovantes
 - a) Les cellules photovoltaïques organiques OPV
 - b) Les Cellules Gratzel ou DSSC
 - c) Les Cellules à concentration ou cellules multi-jonctions

Tableau comparatif des technologies PV

PARTIE 3 – LE PETIT EOLIEN

- 3-1- Perspective et place sur le marché
- 3-2- Mise en contexte dans notre étude et justification de notre benchmark
- 3-3- Les éoliennes à axe horizontal
- 3-4- Les éoliennes à axe vertical

PARTIE 4 - STOCKAGE

- 4-1- Les stockages "courts"
- 4-2- Le stockage à moyen terme
- 4-3- Stockage à long terme
- 4-4- Tableaux récapitulatifs

CONCLUSION

PARTIE 1 - ETAT D'AVANCEMENT DU PROJET

1-1- Respect du planning

A la dernière soutenance intermédiaire, nous vous avions présenté un planning que nous pensions viable. Cependant, nous l'avons retravaillé avec notre cliente pour des raisons d'organisation. En effet, depuis la dernière soutenance, nous avons pris contact avec l'atelier « Energitecture », partie intégrante du projet phosphore qui ne s'occupe que de la partie réseau énergétique. Nous avons donc pris en commun la décision de rythmer nos avancées avec les diverses réunions de cet atelier.

En outre, après mise en accord, nous avons défini exactement les étapes à suivre pour parvenir à notre livrable final. C'est en intercalant chaque étape avec chaque réunion que nous avons établi le nouveau planning. Nous avons donc dégagé 5 grandes étapes à réaliser avant la fin de notre projet (nous détaillerons chaque étape un peu plus loin) :

- **La réalisation d'un benchmark des technologies existantes** en ce qui concerne les énergies renouvelables productibles en masse ou localement.
- **L'arbitrage des technologies à choisir** lors d'une réunion début avril avant la soutenance.
- **L'évaluation des potentiels possibles pour les technologies choisies en 2050.**
- **Les variations temporelles des énergies** avec prise en compte des potentiels hypothétiques préalablement validés par « Energitecture » : cette étape consiste à établir les diagrammes 3D en prenant en compte les changements de production de chaque énergie en fonction du temps.
- Confrontation de la production et la demande (demande qui sera estimée par les membres de l'atelier Energitecture) pour **élaborer le plan de stockage**, sachant que le laboratoire s'occupe de la partie évolution de la demande en 2050.

Il est important de bien réaliser chacune de ces étapes car chaque résultat a une valeur pour notre client. De plus, et point plus critique, chaque étape dépend de celles qui la précédent.

Les dates des réunions avec le laboratoire doivent nous être communiquées pour fixer exactement les dates de fins de chaque étape mais le planning est pour l'instant :



1-2- Répartition des taches

Lors de cette phase de benchmark, nous nous sommes repartis les tâches en fonction des différents domaines à étudier et qui intéressent notre client.

- Batteries : *Pierre Dutheil et Adam El Jaouhari*
- Eoliennes personnelles : *Virgile Galle, Christelle Abou Saab*
- Panneaux photovoltaïques : *Yannick Tian*

De plus, nous avons voulu avancer un peu sur les étapes futures et surtout en ce qui concerne l'évolution temporelle des ressources. Ainsi, nous avons essayé de trouver des données existantes sur la production d'électricité par différentes sources d'énergie, ou alors de trouver des contacts pour acquérir ces données (tâche effectuée par *Yannick Tian et Virgile Galle*)

Chaque personne (ou binôme) a été chargée d'une partie, mais nous avons essayé de travailler en commun pour avoir une certaine cohérence dans notre exposé.

Nous allons présenter dans la suite du rapport l'avancement dans ces domaines.

1-3- But recherché par l'équipe

Le livrable a été bien défini en coopération avec M^{me} Lavaux et un membre du laboratoire Energitecture. Le livrable se décomposera en plusieurs parties correspondants aux étapes citées précédemment, sachant que le point final est un plan dans le temps comprenant production et stockage pour répondre à une demande.

Nous voulons réaliser un livrable qui répond à plusieurs exigences :

- ❖ Utile pour notre client car il pourra l'utiliser directement
- ❖ Donner une « méthode » qui pourrait être utilisée ou améliorée pour ce type d'étude
- ❖ Nous permettre d'avoir un bagage dans ce type de projet
- ❖ Nous permettre d'avoir eu des contacts avec des spécialistes dans leur domaine et travailler avec une véritable équipe

1-4- Problèmes résolus et à résoudre

Durant notre projet, nous avons quelques difficultés, certaines ont été résolues comme le problème de communication avec notre client pour avoir un contact plus interactif, ce qui est nécessaire dans notre projet, car il nous faut demander si les hypothèses ou le sens de nos recherches sont bons, leur conviennent et ne font pas redondances avec des résultats qu'ils ont déjà.

Cependant, quelques difficultés sont apparues dans cette phase de notre projet et plusieurs seraient enclins à contrecarrer nos pans. La première est celle de ne pas avoir été assez réactif cette semaine et de ne pas avoir communiqué plus tôt avec Mme Lavaux du rendez-vous. N'ayant pas d'informations, nous n'avons pas pu assister à la réunion ne recevant que trop tard les informations, ceci étant du à un concours de circonstances.

Il nous faut donc récupérer les conclusions de cet atelier.

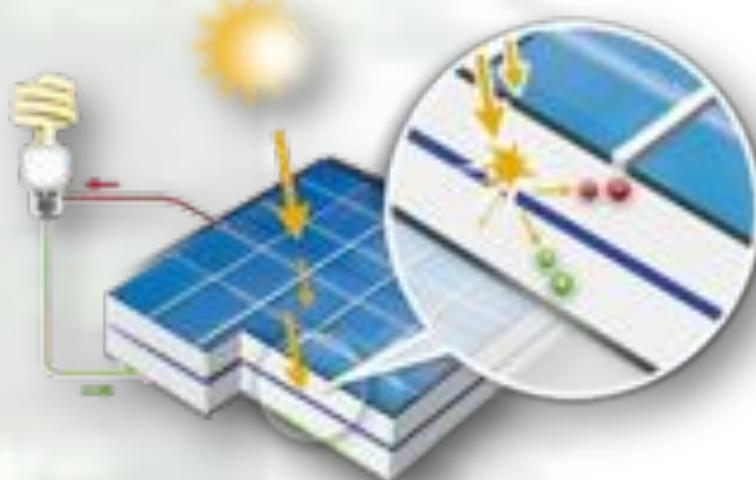
De plus, notre planning est très chargé et le projet est de très grande envergure et va nous demander beaucoup de temps, sachant que nous manquons encore de beaucoup d'information, quitte à avoir des chiffres moins précis, il nous faudra avancer vite pour de toute façon, avoir le résultat final qui est très important et qui constitue le cœur de notre projet. Nous avons donc décidé de se voir très régulièrement jusqu'à la fin du projet pour perdre le moins de temps possible et être le plus en avance possible pour éviter une prise de retard, problème que nous n'avons pas eu jusque là mais qui pourrait être critique.

PARTIE 2 – TECHNOLOGIE PHOTOVOLTAÏQUE

Dans le cadre de l'élaboration d'un quartier à énergie positive, l'énergie électrique produite par les panneaux photovoltaïques sera essentielle et dominante, d'où la nécessité de recenser les technologies existantes.

Il y a généralement trois générations de cellules photovoltaïques que l'on classe suivant la maturité des développements technologiques et industriels.

Le principe photovoltaïque



La lumière du soleil se compose de photons contenant une énergie correspondant aux différentes longueurs d'onde du spectre solaire. Quand un photon heurte une cellule photovoltaïque, son énergie peut être transférée à un électron dans le matériau semi-conducteur de la cellule. Avec cette énergie supplémentaire, l'électron peut alors s'échapper de sa position normale dans l'atome créant un « trou », qui deviendra une partie d'un courant dans un circuit électrique. C'est ce qu'on appelle la paire électron-trou.

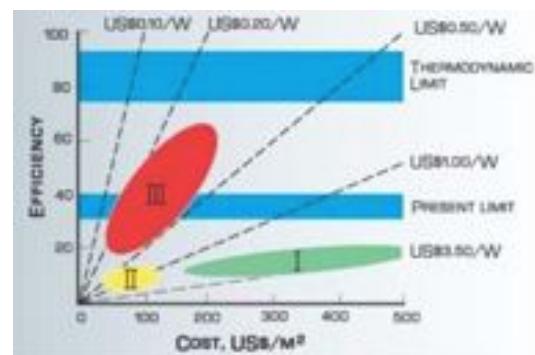
Une cellule photovoltaïque est une diode, formée de deux couches de matériaux de semi-conducteur dopées de sorte que l'une conduise les charges négatives et l'autre, les charges positives. Ce phénomène crée un champ électrique permanent dans la cellule.

Grâce à cet effet diode et lorsque la paire électron-trou a été créée, les charges négatives vont être séparées des charges positives. Il se crée donc une différence de potentiel entre les couches N et P de la cellule. Un courant circule si une résistance (ampoule par exemple) est placée entre ces contacts.

Rendement : $E = H_i \times S \times \eta$

- E [kWh/an] : Energie électrique produite en aval du système sur un an.
- H_i [kWh/m².an] : Irradiation globale reçue dans le plan des modules
- S [m²] : Surface du champs de module photovoltaïque
- η : rendement global du système

1. **Le Silicium cristallin**, qui représente 91% du marché.
2. **Les Couches minces** (thin films), 8% du marché.
3. Le « reste », les **technologies innovantes** au stade de la recherche et des premières applications, moins de 1% du marché.



2-1- Le Silicium Cristallin

Ces cellules de première génération sont basées sur une seule jonction p-n (zone du cristal où le dopage varie brusquement, passant d'un dopage p à un dopage) et utilisent généralement le silicium sous forme cristalline comme matériau semi-conducteur. La méthode de production basée sur les wafers de silicium (disques très fins de matériau semi-conducteur utilisé pour produire des circuits intégrés) est très énergivore et donc très **chère**. Par ailleurs, elle nécessite un silicium d'une grande pureté.



L'avantage de cette technique est de bénéficier de rendements élevés (entre 15% et 20%) et d'avoir une grande durabilité (supérieure à 15 ans).

On différencie également les cellules à base de silicium monocristallin et polycristallin. Ces dernières ont un rendement inférieur par rapport aux premières, mais ont un coût de fabrication moins élevé.

2-2- Les couches minces

Les couches minces ("thin films") constituent la seconde génération de technologie photovoltaïque. Dans cette génération, on distingue le silicium amorphe (a-Si), le disélénium de cuivre indium (CIGS), le tellurure de cadmium (CdTe), entre autres.



Dans le cas de couches minces, la couche de semi conducteur est directement déposée sur un substrat (par exemple du verre). La production de ce type de cellules est moins coûteux que la première génération puisqu'elle consomme moins de matériau semi-conducteur et ne nécessite pas de passer par l'étape de transformation du silicium en "wafers". Le problème des cellules de seconde génération est le rendement moindre de ce type de cellules (6-7% et 14% en labo) et la toxicité de certains éléments (cadmium) pour leur fabrication. Un autre problème concerne l'Indium qui est un matériau rare qui pourrait poser un problème d'approvisionnement ou d'inflation sur les prix à terme. Cependant, cette seconde génération a beaucoup d'avantages pour des marchés de niche comme les applications en modules flexibles, avec de faibles illuminations ou avec des températures élevées.

Le disélénium de cuivre Indium (CIGS) qui est au stade de la production industrielle et offre un rendement de 10 à 12 % pour ses modules commerciaux ne présente pas les problèmes de toxicité du cadmium.

Les réductions de coût attendues à moyen terme pour cette technologie sont donc très prometteuses.



2-3- Les Technologies innovantes

a) Les cellules photovoltaïques organiques OPV

Face à la technologie utilisant les matériaux inorganiques, les cellules solaires à base de composés organiques connaissent un développement considérable.

Le matériau photovoltaïque utilisé n'est plus du silicium, du CIGS ou du CdTe, mais un ou des polymères fabriqués à partir de composés chimiques organiques type carbone, oxygène, hydrogène, ou azote.

Ces panneaux solaires organiques sont fabriqués par des technologies d'enduction, mais aussi par des technologies d'impression roll to roll très rapides type flexographie, sérigraphie et même jet d'encre.

Leur coût de fabrication est des plus économiques de par le procédé de fabrication mais également par le coût des matériaux utilisés, car la matière première est elle même bon marché et les quantités utilisées sont très faibles (rapport 1/1000 par rapport au silicium cristallin).



Leur rendement est par contre encore très faible de l'ordre de 4 à 6% contre 15 à 20% pour les panneaux solaires au silicium cristallin.

Ces panneaux solaires organiques sont produits de façon écologique sans présence de métaux lourds tels que le cadmium, et n'utilisent pas de matériaux rares comme l'Indium ou le Gallium.

b) Les Cellules Gratzel ou DSSC

Les cellules Gratzel ou DSSC (Dye Sensitized Solar Cells) qui sont également appelées cellules à pigment photosensible est faite d'un mélange colorant/solvant liquide, emprisonné entre deux électrodes transparentes. Le pigment est contenu dans un matériau semi-conducteur en contact avec la face transparente exposée à la lumière. Sous l'effet du pigment qui réagit au rayonnement solaire, le solvant joue un rôle d'électrolyte donneur d'électron. Les électrons s'accumulent dans le matériau semi-conducteur et créent une différence de potentiel avec l'autre face de la cellule.



Ce phénomène est très similaire à la photosynthèse naturelle qui utilise l'eau et la chlorophylle dans le milieu végétal.

Ces cellules DSSC ont obtenu des rendements maxima en laboratoire de l'ordre 12 % mais les produits commerciaux atteignent aujourd'hui 3 à 5 % de rendement.

Cette technologie est très prometteuse car elle utilise des composants peu onéreux, autorise un procédé de fabrication simple et permet de fabriquer des panneaux solaires souples ou rigides qui restent translucides et qui peuvent ainsi par exemple facilement s'intégrer dans un vitrage.



Il y a cependant quelques freins à leur développement qui sont notamment leur résistance moindre au vieillissement notamment sous rayonnement UV, et des problèmes de gel ou d'étanchéité inhérents à leur utilisation de produits liquides.

De nombreux chercheurs et industriels estiment que l'OPV constitue, au même titre que les technologies DSSC (Dye Sensitized Solar Cells ou cellules de Grätzel), les solutions d'avenir.

c) Les Cellules à concentration ou cellules multi-jonctions

Les cellules photovoltaïques à concentration se basent sur l'utilisation de lentilles ou miroirs paraboliques pour multiplier l'énergie incidente provenant du soleil sur un module photovoltaïque afin d'augmenter l'énergie produite par ce module. L'intérêt pour la concentration réside d'une part dans le coût du kilowatt heure produit et d'autre part dans la compacité des installations.



Si le choix du miroir ou de la lentille n'est pas déterminant sur le choix des cellules, le coût relativement faible des miroirs et lentilles tend à ce que l'on choisisse des cellules à haut rendement (cher mais très performant) associé à des niveaux de concentration élevé, afin de produire un maximum d'électricité avec un minimum de cellules.

En pratique, ce sont couramment des cellules à triple jonction, avec des rendements au-dessus de 30%, autrefois utilisé pour des applications spatiales, qui sont utilisées en conjonction avec de la haute concentration posé sur des trackers bi-axiaux.

Si aujourd'hui les systèmes à concentration sont encore peu déployés, c'est en partie dû à la complexité du choix système / composants. Miroir, lentille, cellule silicium, cellule Gallium Arsenide, niveau de concentration... les choix sont nombreux et l'optimisation, selon les entreprises, a pris des chemins différents. Depuis les années 1970 quand les premiers systèmes furent expérimentés grandeur-nature, jusqu'aux années 1990 quand la recherche et le développement des systèmes furent accélérés, différents organismes de recherche et entreprises ont travaillé sur des technologies qui sont aujourd'hui installées et commercialisées, pour l'instant en faible quantité.

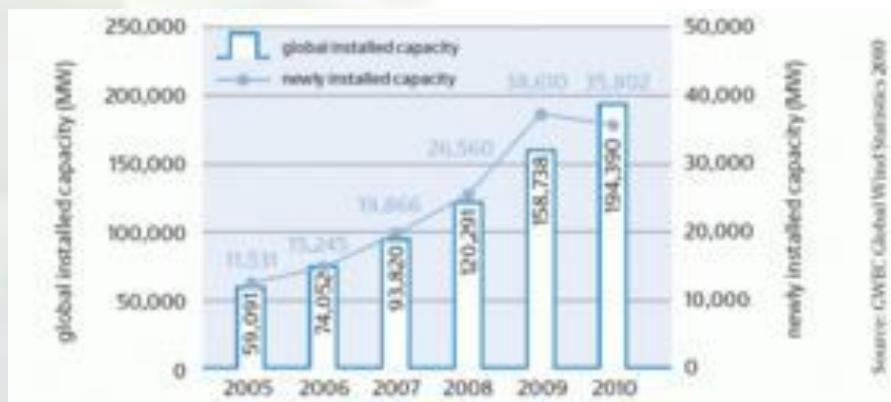
Tableau comparatif des technologies PV

Geography	Population	Population Dependency %	Population Growth %	GDP Growth %	Monetary Policy	Inflation	Interest Rate
North America	350,000,000	18-20	+0.5	+0.5%	Quantitative Easing	2.5%	1.5%
Europe	500,000,000	18-20	+0.5	-0.5%	Quantitative Easing	2.5%	1.5%
China	1300,000,000	18-20	+0.5	+0.5%	Monetary Policy	5.5%	3.5%
India	1300,000,000	18-20	+0.5	+0.5%	Monetary Policy	5.5%	3.5%
Australia	25,000,000	18-20	+0.5	+0.5%	Quantitative Easing	2.5%	1.5%
United Kingdom	65,000,000	18-20	+0.5	-0.5%	Quantitative Easing	2.5%	1.5%
Japan	125,000,000	18-20	+0.5	-0.5%	Monetary Policy	5.5%	3.5%
South Korea	50,000,000	18-20	+0.5	+0.5%	Monetary Policy	5.5%	3.5%
Canada	35,000,000	18-20	+0.5	+0.5%	Monetary Policy	5.5%	3.5%
Africa	1200,000,000	18-20	+0.5	+0.5%	Quantitative Easing	2.5%	1.5%
Middle East	50,000,000	18-20	+0.5	+0.5%	Monetary Policy	5.5%	3.5%
Latin America	600,000,000	18-20	+0.5	+0.5%	Monetary Policy	5.5%	3.5%
Other Regions	100,000,000	18-20	+0.5	+0.5%	Monetary Policy	5.5%	3.5%

PARTIE 3 – LE PETIT EOLIEN

3-1- Perspective et place sur le marché

Après le recul enregistré sur le marché éolien à l'échelle mondiale, on table, pour les années à venir, sur une légère reprise. D'ici 2050, 34 % de l'approvisionnement en électricité pourrait, au niveau mondial, être couvert par l'énergie éolienne. En Europe, l'Espagne, le Portugal, la Grande-Bretagne, la France et l'Italie sont actuellement considérées comme des marchés au potentiel de croissance élevé.



La branche de la recherche et du développement de l'énergie éolienne va, en autres, s'attacher à limiter les effets négatifs pouvant toucher l'environnement (émissions sonores et rayonnement, collision entre avions et / ou hélicoptères).

(En effet depuis 2010, les autorités britanniques ont définis des critères de qualité drastique pour le petit éolien. La certification MCS garantie la fiabilité des produits et l'exactitude des données annoncées).

3-2- Mise en contexte dans notre étude et justification de notre benchmark

Nous avons vu que le grand éolien n'avait pas sa place à Grenoble car le vent y est trop faible ou trop turbulent. Une de solutions à considérer est celle d'exporter la production d'électricité par de l'éolien en dehors de Grenoble ; cependant cette décision ne nous appartient pas et fait intervenir de nombreux acteurs dont ceux de la protection de l'environnement car, il existe autour de Grenoble beaucoup de parcs naturel.

Néanmoins nous n'allons pas laisser tomber l'éolienne totalement, ou en tout cas pas aussi facilement.

C'est pourquoi nous avons mené cette étude sur les différents types d'éoliennes qui pourraient être installées chez tous les particuliers et rentables malgré une faible vitesse de vent ou des caractéristiques apparemment contre l'éolien

Aujourd'hui de plus en plus de petites entreprises proposent leurs éoliennes à des personnes ayant la place d'en installer. Elles ont toutes des caractéristiques spéciales.

Nous avons décidé d'en sélectionner quelques unes et de présenter celles qui émergent aujourd'hui.

Dans cette étude nous avons découvert qu'il existait deux types d'éoliennes et que cela changeait considérablement leurs caractéristiques. C'est donc ainsi que nous allons vous les présenter.

3-3- Les éoliennes à axe horizontal

Ces éoliennes sont celles qui sont les plus répandues aujourd’hui. En effet, leur principe de fonctionnement est bien plus intuitif que celui à axe vertical et s'est donc développé bien avant.

Ces éoliennes ont l'inconvénient (dans le cas où l'on est c'est-à-dire dans une agglomération) d'être très grandes et encombrantes. Certes, elles sont plus petites que celles utilisées en campagne faisant plusieurs dizaines de mètres. Par exemple, la Skystream ou la WH 3 sont hautes de 11,5m ce qui est moins grand qu'une éolienne classique, mais l'installation va donc rester un problème dans ce cas. Mais, **leurs pales sont beaucoup plus petites** ce qui leur donne un diamètre moins conséquent et donc une meilleure adaptabilité au terrain. Les deux éoliennes citées précédemment ont des pales plus petites que 3m, ou encore l'Eoltec a des pales de 5m.

De plus, elles présentent plusieurs autres avantages comme le fait d'avoir des **vitesse de fonctionnement plus faibles** que les grandes éoliennes (la Gaia 133 n'a une vitesse minimale¹ que de 3,5m/s et une vitesse nominale² inférieur à 10m/s). Ceci est considérablement mieux qu'une éolienne « normale » qui a une vitesse nominale supérieur à 12m/s ce qui la rendait inutilisable à Grenoble.

Leur **puissance développée n'est pas du tout négligeable et bien supérieure à celle possible avec des éoliennes à axe horizontale**. C'est ainsi que la Jimp 25 possède une puissance nominale de 25 kW et la Voco Energy 10 kW

Ainsi, les éoliennes à axe horizontal pour les particuliers sont une version plus petite que les grandes éoliennes habituellement installées. Néanmoins, elles produisent tout de même une énergie non négligeable, et sont donc à considérer dans notre choix. Leur installation serait à étudier car chacune a une forme particulière

¹ Vitesse du vent à partir de laquelle l'éolienne commence à débiter une puissance utile (c'est-à-dire de la puissance électrique)

² Vitesse de vent notée pour laquelle une éolienne délivre sa puissance maximale

Nom	Skystream 3.7	WH 3 G2	Eoltec ES 5.6-6	Xzeres 442 SR	GAIA 133	Evance R9000	Voco Energy 10kW	Jimp 25
Caractéristiques								
Rotor	axe horizontal	axe horizontal	axe horizontal	axe horizontal				
Vents	forts et modérés							
Nombre de pales	3	3	2	3	2			
Diamètre (m)	3,7	4	5,6	7,2	13	5,4	9,7	10,4
Hauteur des pales (m)	2					2,5		2
Hauteur du mât (m)	11,5	11,5	11	11,5	15 - 18			
Bruit (dBA)	45					45	54	46
Vitesse de rotation (tours/min)	330	270	250	130	56			
Vitesse								
vitesse de démarrage (m/s)	3,5	3	2,8	3,5	3,5			
vitesse nominale (m/s)	10	10	12	11	9,5			
vitesse maximale (m/s)	60	25	60	45	25			
Production électrique								
Puissance nominale (kW)	2	3	6	9,2	11	5	10	25
Puissance maximale (kW)	2,4	3,2	6,4	12	14			
Production Type/An (kWh)	3600	5200	10200	15750	27502	9000	21100	55000



3-4- Les éoliennes à axe vertical

Cette technologie est bien plus récente que la précédente. Elle fait intervenir des éoliennes aux formes bien plus originales.

Cependant, ce type d'éoliennes résout véritablement le problème de l'installation et de l'incorporation à un milieu dans un tout petit volume. En effet, **les dimensions de ces éoliennes sont significativement plus petites** que pour les précédentes éoliennes. Par exemple, la WT1 by Starck ne fait que 6m de haut. Mais chose encore plus importante comme nous venons de le dire c'est le volume occupé par les pales. Ici, les pales sont de l'ordre du mètre pour la WT1, de 2m pour la WV4 G2 ainsi que pour la Pramac. On voit ainsi que par exemple, dans une rue étroite où des couloirs de vent se forment souvent, ces éoliennes sont facilement incorporables.

De surcroît, elles fonctionnent avec **différents types de vent**: en tourbillons³, en laminaire⁴ et turbulent⁵... Il suffit donc d'étudier localement l'aspect du vent et d'y installer l'éolienne qui convient et la plus approprié à ce type de vent.

Les vitesses de démarrage sont plus basses que pour des éoliennes à axe horizontal ce qui n'est pas le cas de la vitesse nominale. Cependant, ceci n'est pas forcément un problème. En effet, nous savons que la vitesse moyenne du vent à Grenoble est inférieure à 10m/s, cependant, le vent étant un phénomène aléatoire, il existe des lieux dans la ville (comme des couloirs de vent formés involontairement par les immeubles construits d'une certaine manière) où le vent y est beaucoup plus puissant et c'est ce type de perturbations locales que nous allons pouvoir capter avec ce type d'éolienne.

Les puissances nominales développées sont légèrement inférieures aux puissances créées avec les éoliennes à axe horizontal. **Mais elles restent importantes.** Elles varient de 1 kW (pour la Windtronics, la Pramac ainsi que la WT1) jusqu'à 20 kW (pour la Ropatec Big).

³ [Masse d'air, vent qui tournoie rapidement](#).

⁴ On parle d'un écoulement laminaire, lorsqu'un fluide, glisse sur un solide sans tourbillons.

⁵ La turbulence désigne des mouvements aléatoires de l'air se superposant au mouvement moyen

Nom	WT1 by STARCK	WV 4 G2	Pramac by Starck	WindTronics	Ropatec Maxi	Ropatec Big
Caractéristiques						
Rotor	axe vertical	axe vertical	axe vertical	axe vertical	axe vertical	axe vertical
Vents	très tourbillonnants	très tourbillonnants	turbulents		turbulents	turbulents
Nombre de pales	3	3	3			
Diamètre (m)	1,45	2,75	2,25	1,8	4,6	8,5
Hauteur des pales (m)	1,45	4,2	1,5		2,5	5,8
Hauteur du mât (m)	6	11,5				
Bruit (dBA)			42	35	42	46
Vitesse de rotation (tours/min)	415	300				
Vitesse de fonctionnement						
vitesse de démarrage (m/s)	3	2,5		0,83		
vitesse nominale (m/s)	14	12				
vitesse maximale (m/s)	15	25				
Production électrique						
Puissance nominale (kW)	1	4	1	1,1	6	20
Puissance maximale (kW)	1	4,5				
Production Type/An (kWh)	900	7620	1301	2000	8000	30000



PARTIE 4 - STOCKAGE

Dans la perspective d'une production d'énergie dépendant entièrement de phénomènes naturels plus ou moins prévisibles, il nous faut un moyen de gestion efficace de cette ressource. Les solutions actuelles à ce problème sont les smart-grids et le stockage d'énergie ; cependant l'échelle de temps sur laquelle les smart-grids agissent, ne convient pas à notre problème qui nécessite des solutions à moyen et long terme. Nous avons par conséquent étudié les différents types de batteries, selon la durée de leur stockage.

4-1- Les stockages "courts"

Ces solutions sont envisagées pour le lissage de la production énergétique. Il s'agit de les utiliser directement après l'appareil de production (éolienne par exemple) afin que cette production soit plus régulière et ainsi plus facile à gérer.

LE VOLANT D'INERTIE

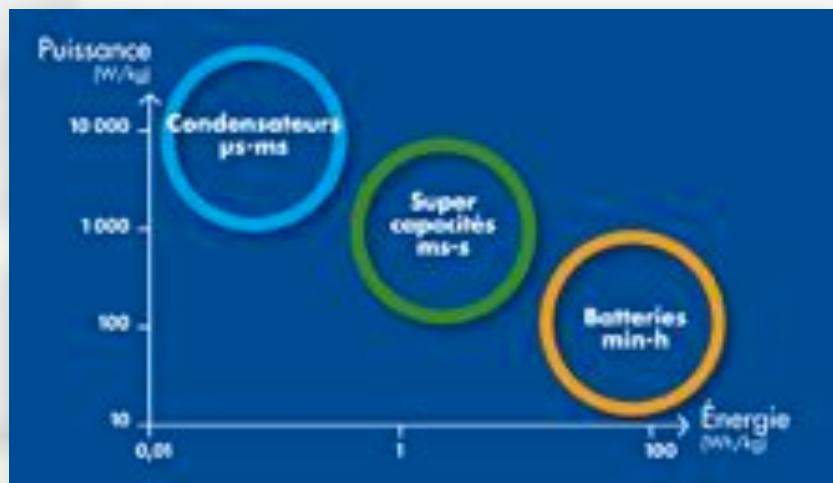


L'énergie est stockée sous forme mécanique, on l'utilise pour mettre en rotation un disque. On récupère alors l'énergie en freinant ce dernier.

Le problème évident est que, par frottement, l'énergie est très vite dissipée et la durée du stockage ne peut excéder quelques minutes. Par ailleurs, l'installation est encombrante à cause de la taille des disques dont dépendent directement leurs moments et donc la capacité de stockage.

En revanche, ce système possède un très bon rendement (>95%), et il est moins cher qu'une solution par batteries ($\approx 200\text{€}/\text{kWh}$).

LES SUPERCAPACITES



Le principe de cette solution est voisin de celui du condensateur, mais le fil diélectrique est remplacé par un électrolyte ce qui permet d'obtenir des énergies volumiques plus élevées. Cette solution est déjà employée dans le domaine du transport et s'avère très prometteuse dans le domaine de l'énergie, elle peut notamment supplanter les volants d'inertie. En effet, malgré une énergie volumique moins élevée, ils sont plus rapides.

4-2- Le stockage à moyen terme

Ces moyens de stockage sont voués à être utilisés sur des durées allant de la journée à la semaine. Ils doivent pouvoir stocker la quantité produite aux heures creuses afin de la réémettre aux heures de pointe. Pour cela, il faut avoir une énergie volumique suffisamment élevée pour pouvoir contenir la totalité de la production sur une journée, ainsi qu'une puissance élevée afin de pouvoir la restituer sur une courte période.

Les seules solutions que nous avons retenues pour cette durée sont des batteries. En voici les principaux types :

LE TYPE Ni-MH

Bien qu'elles soient actuellement dépassées en terme d'énergie volumique par les batteries de type Li-Ion ou Li-Polymères, elles sont plus rapides et ne possèdent une plus faible sensibilité à l'effet mémoire. Par ailleurs, l'absence de plomb et de cadmium les rend moins polluantes et plus aisément recyclables.

Néanmoins, elles s'avèrent légèrement plus chères.

LE TYPE Ni-ZN

Elles ont des caractéristiques voisines du type Ni-Mh, mais sont moins chères, plus rapides et possèdent une durée de vie plus élevées pour la même utilisation.

LE TYPE Li-ION

Leur principal avantage est leur énergie volumique, en revanche leur durée de vie est plus courte que pour le type Ni-Zn.

LES PLAQUES TUBULAIRES

Les batteries tubulaires sont très populaires en Europe et au Japon, à cause de leur excellente performance en utilisation stationnaire et en traction.
Cependant, il s'avère difficile de trouver des données chiffrées.

4-3- Stockage à long terme

Le but est de répartir l'énergie produite sur une échelle de l'ordre du mois voire de la saison. Il nous faut donc une grande capacité de stockage ainsi qu'un faible taux de déperdition (évaporation pour le stockage hydraulique, ou autodécharge pour une batterie).

LES BATTERIES

Il y a trois principaux types de batteries présentant des caractéristiques avantageuses dans ce domaine (appelées batteries stationnaires). On compte parmi celles-ci les *batteries plomb-acide* stationnaires qui peuvent être utilisées pour stocker de l'énergie durant un mois ou plus, moyennant une faible perte par autodécharge, mais leur énergie volumique est assez faible. Et leur prix reste élevé compte-tenu de leur durée de vie. On cite aussi les *batteries lithium phosphate* pour leur durée de vie élevée, une capacité double de celle des batteries plomb-acide et des performances en durée de stockage élevées.

Le troisième type nous intéresse principalement pour sa très grande énergie volumique, il s'agit des *batteries lithium-air*.

LA PILE A COMBUSTIBLE

Une pile à combustible est un dispositif électrochimique qui convertit l'énergie chimique d'une réaction directement en énergie électrique tout en dégageant de la chaleur. Toutefois, bien que les piles à combustibles aient un comportement et des caractéristiques semblables à celles d'une batterie, les deux systèmes diffèrent sur de nombreux points. Contrairement à ce qui se passe pour les batteries, dans une pile à combustible les électrodes ne sont pas consommées avec le temps et les produits ne sont pas stockés à l'intérieur de la pile. Le combustible et le comburant proviennent d'une source externe et, aussi longtemps qu'ils sont fournis à la pile, l'électricité continue de circuler.

Le pas est franchi : les piles à combustibles (PAC), qui étaient déjà sorties du laboratoire, sont maintenant de véritables produits de série. Areva et Air liquide viennent de présenter des prototypes de PAC compactes de série. Reposant toutes deux sur la technologie PEM (proton exchange membrane), elles ont pour objectif de défricher le marché en identifiant les clients, les besoins et les avantages comparatifs. *Evopac*, la PAC d'Axane (100% Air liquide) a une capacité de 0,5 à 10 kWe. La plus courante, d'une capacité de 2,5 kWe, pèse 75 kg et mesure 98x54x64 cm. *Helion* (filiale d'Areva) lance une gamme allant de 2 à 5 kWe, mais prévoit de proposer des puissances de 50 voire 300 kWe. Parmi les utilisations mentionnées par les deux fabricants: électrification de sites isolés, moyen de secours dans les hôpitaux, alimentation de bateaux ou de yacht... Le marché automobile ne s'ouvrirait pas avant 2015-2020. En attendant, ces PAC ont encore des progrès à faire sur le plan économique (passer de 20.000 à 1.500 € par kWe installé) et de la durée de vie (de 1.500 heures à 30-40.000 heures).

4-4- Tableaux récapitulatifs

type de super capacités	Densité d'énergie massique (Wh/kg)	Densité de puissance massique (W/kg)
EDLC ACN	5	1500
C-MnO ₂	4	650
NiOOH-C	3	750

Tableau 1 - Les moyens de stockage très courts

Type de batterie	Densité d'énergie maximale (Wh/kg)	Densité de puissance maximale (kW/kg)	Cycles vita (Nombre de cycles)	Efficacité (%)	AutodischARGE par mois (%)	Coût (€/Wh)
Acide	70	100	400	75	>20	100-150
NiCd	80	2000	200	85	>20	1000
Li-ion	150	200	1000	85	10,00%	500-1000

Tableau 2 - Le stockage à moyen terme (pour une durée de l'ordre de plusieurs heures ou d'une journée)

Type de batterie	Densité d'énergie maximale (Wh/kg)	Densité de puissance maximale (kW/kg)	Cycles vita (Nombre de cycles)	Efficacité (%)	AutodischARGE par mois (%)	Coût (€/Wh)
Plomb-acide	60	60	500		>20	100
Li-Po	120	200	200		1,00%	
Li-ion	150	200	1000			

Tableau 3 - Le stockage à long terme (pour un stockage hebdomadaire et mensuel)

Type de batteries	Nombre d'unités commercialisées	Nombre d'unités importées et exportées	Volume moyen d'unité	Volume moyen d'unité	Volume moyen d'unité	Volume moyen d'unité
Piles au cuivre Ni	1.000	0.00	400			
Piles au nickel (nickel-zinc)			1.000			
Piles au sulfure	14		1.000			
LiSOCl (batteries Li-SOCl2) (LiM/S)	81		2.000			
Batteries à électrolyte gelifié	1.000		400			
LiCoO2	40	0.00	1.000	71	33.000	400.000
polymères solides (LiPo)	100	0.00	600.000	91		600.000
Silice (Non ReLiO)	1.00	0.00	400		+ 500 (3.2%) (non)	
LiPF6/Sulfur/Vanadium batteries	91	0.00	1.000			
Total	1.000	0.00	400		+ 500	

Tableau 4 – Les autres types de batteries

CONCLUSION

Ainsi, nous vous avons présenté les différents marchés qui existent aujourd’hui en ce qui concerne les énergies qui vous intéressaient.

Nous avons abordé en premier lieu, les deux types de production qui seront à considérer dans notre projet (le photovoltaïque et le petit éolien). Puis nous nous sommes penchés sur la deuxième partie importante quand on parle de gestion du réseau électrique : le stockage. Et plus particulièrement, le stockage par batterie qui est aujourd’hui le plus développé et le plus prometteur.

Ainsi, avec tous ces tableaux comparatifs, nous espérons vous avoir donné une bonne vue d’ensemble des ces trois marchés et vous permettre de faire le meilleur choix entre ces technologies, quitte à approfondir les recherches sur les technologies sélectionnées.

Thème : Bâtiment à énergie positive

Quelles perspectives pour la production et le stockage d'électricité ?

- Rapport Final - Juin -

Équipe TBD10

Abou Saab Christelle
Dutheil Pierre
Galle Virgile
El Jaouhari Adam
Tian Yannick



Référent Pédagogique

Pierre JEHEL

Client Projet

Sarah LAVAUX



MISE EN CONTEXTE

PARTIE 1 : LES DEMANDES ENERGETIQUES TOTALES

1.1. SOURCES ET HYPOTHESES DE CALCULS	102
1.2. CALCULS ET AUTRES APPROXIMATIONS	105
1.2.1. DETERMINATION DU GRAPHE <u>SANS CONSIDERER LE DEPLACEMENT DE CONSOMMATION DANS LE TEMPS SUR LA JOURNEE</u>	105
1.2.2. DETERMINATION DU GRAPHE <u>EN CONSIDERANT LE DEPLACEMENT DE CONSOMMATION DANS LE TEMPS SUR LA JOURNEE</u>	106
1.3. CONCLUSION INTERMEDIAIRE	109

PARTIE 2 : LA PRODUCTION ELECTRIQUE

2.1. LA PRODUCTION ELECTRIQUE PHOTOVOLTAÏQUE	112
 2.1.1. LA CENTRALE DU LGM COMME REFERENCE.....	112
 2.1.2. METHODE DE CALCUL.....	114
2.1.2.1. L'ACQUISITION DES DONNEES.....	114
2.1.2.2. CONVERSION PUISSANCE ENERGIE.....	114
2.1.2.3. OBTENTION DU GRAPHE	115
<i>Code macro</i>	117
<i>Tableau final</i>	117
2.1.3. ANALYSE DU GRAPHE	118
 2.2. LA PRODUCTION HYDROELECTRIQUE.....	120
 2.2.1. CHOIX DE LA TURBINE EN FONCTION DE LA RIVIERE	120
 2.2.2. ETUDE DU STOCKAGE	122

PARTIE 3 : LES DIVERS SCENARIOS ET MIX ELECTRIQUE

3.1. RECAPITULATIF DES DIVERS TABLEAUX ET GRAPHES	125
3.2. REPRESENTATION DE LA DIFFERENCE ENTRE LA PRODUCTION ET LA CONSOMMATION - STOCKAGE	130
3.3. PLAN DE STOCKAGE AVEC UN HYPOTHETIQUE STOCKAGE SAISONNIER.....	131
3.4. PLAN DE STOCKAGE SANS UN HYPOTHETIQUE STOCKAGE SAISONNIER	131

CONCLUSION

1.1. SOURCES ET HYPOTHESES DE CALCULS	102
1.2. CALCULS ET AUTRES APPROXIMATIONS	105
1.2.1. DETERMINATION DU GRAPHE <u>SANS CONSIDERER LE DEPLACEMENT DE CONSOMMATION DANS LE TEMPS SUR LA JOURNEE</u>	105
1.2.2. DETERMINATION DU GRAPHE <u>EN CONSIDERANT LE DEPLACEMENT DE CONSOMMATION DANS LE TEMPS SUR LA JOURNEE</u>	106
1.3. CONCLUSION INTERMEDIAIRE	109
2.1. LA PRODUCTION ELECTRIQUE PHOTOVOLTAÏQUE	112
2.1.1. LA CENTRALE DU LGM COMME REFERENCE.....	112
2.1.2. METHODE DE CALCUL.....	114
2.1.2.1. L'ACQUISITION DES DONNEES.....	114
2.1.2.2. CONVERSION PUISSANCE ENERGIE.....	114
2.1.2.3. OBTENTION DU GRAPHE	115
<i>Code macro :</i>	117
<i>Tableau final :</i>	117
2.1.3. ANALYSE DU GRAPHE	118
2.2. LA PRODUCTION HYDROELECTRIQUE.....	120
2.2.1. CHOIX DE LA TURBINE EN FONCTION DE LA RIVIERE	120
2.2.2. ETUDE DU STOCKAGE	122
3.1. RECAPITULATIF DES DIVERS TABLEAUX ET GRAPHES	125
3.2. REPRESENTATION DE LA DIFFERENCE ENTRE LA PRODUCTION ET LA CONSOMMATION - STOCKAGE	130
3.3. PLAN DE STOCKAGE AVEC UN HYPOTHETIQUE STOCKAGE SAISONNIER.....	131
3.4. METHODE DE CALCUL POUR LE PLAN DE STOCKAGE SANS STOCKAGE INTER-SAISONNIER	135

Mise en contexte

Nous rappelons que le but final de notre projet est de produire des mix électriques qui mettent en œuvre les différents moyens de production de l'électricité avec les énergies vertes renouvelables, et les divers moyens de stockage choisis.

En effet, il s'agit d'envisager quelques scenarios réalistes et optimaux, avec quelques variantes, qui montrent une certaine interdépendance et organisation entre les moyens de production et les moyens de stockage.

Nous allons représenter les résultats sous forme de diagrammes 3D concernant la production électrique, la demande et enfin, et la différence des 2 donc les besoins en stockage.

Pour réaliser ces scenarios, nous allons utiliser plusieurs hypothèses intermédiaires simplificatrices, qu'on explicitera et justifiera au fur et à mesure de notre avancement.

Les moyens de production retenus sont la production photovoltaïque et la production hydroélectrique : l'énergie éolienne étant abandonnée pour la faiblesse de son rendement à Grenoble, à cause du manque de vent.

En outre, les moyens de stockage retenus après notre benchmark sont le stockage par batteries et par potentiel hydraulique.

Quand à la demande, nous allons considérer la consommation énergétique totale à Grenoble : secteur tertiaire, secteur résidentiel, et même les voitures électriques.

Partie 1

Les demandes énergétiques totales

Après notre rencontre avec l'atelier Energitecture, nous allons supposer que 30% de la demande donc la consommation journalière peuvent-être déplacée à différentes heures de la journée, et ceci en modifiant les habitudes des gens et leurs modes de vie.

On considère donc la demande énergétique totale à Grenoble (tertiaire, résidentiel, voitures électriques). Nous envisageons aussi d'enlever la part de la demande due au chauffage.

1.1. Sources et hypothèses de calculs

Ce paragraphe va expliquer seulement les grandes hypothèses que nous avions décidées de prendre avant de faire le calcul pour le simplifier suffisamment pour qu'il soit faisable dans le délai imposé mais aussi et surtout pour que néanmoins le calcul reste réaliste et soit assez précis pour déterminer sans de trop grandes imprécisions notre plan de stockage et pour que finalement, celui-ci soit viable et non pas un simple calcul inutile.

Donc tout d'abord, nous avons utilisé plusieurs sources qui nous ont donné les chiffres suivants. Ces sources nous avaient été confirmées comme bonnes par notre cliente ce qui nous permettait de mener à bien nos calculs. Nous avons donc utilisé :

- Le site RTE⁶, qui prévoit au niveau national la consommation d'électricité globale. Après avoir fait les prévisions, elle les compare avec les véritables données. C'est ces données que nous avons donc utilisées. Nous avons pris les valeurs de Juin 2011 à Mai 2012. En réalité, nous n'avons pas pris toutes les données pour tous les jours de chaque mois, ce qui aurait été trop long à traiter.
Nous avons donc seulement pris en compte, pour chaque mois, le 5, le 15 et le 25 suivant des coefficients qui seront développés dans la deuxième partie. La grande hypothèse que nous avons décidée de prendre, encore une fois avec l'accord de notre cliente, a été de considérer que Grenoble se comportait globalement comme la France entière (en termes de forme de la demande bien sûr). Nous allons donc considérer que ce n'est qu'une relation de proportionnalité qui lie la consommation d'électricité à Grenoble et celle en France métropolitaine.

⁶ Réseau de transport d'électricité :

http://clients.rte-france.com/lang/fr/visiteurs/vie/courbes_prev_hebdo_histo.jsp

Ceci n'est pas choquant et peut rester utile, car on le rappelle Grenoble n'est qu'un exemple choisi par Energitecture et nous aimerais que la méthode que nous proposons à notre client, Eiffage, soit applicable dans un plus vaste domaine.

Donc, ici dans le cas de la demande, le modèle pourrait être utilisé, sans une trop grande marge d'erreur, partout en France métropolitaine.

- Nous allons raisonner en énergie, il nous faudra donc transformer la consommation donné en puissance (Watt) sur le site du RTE⁷.
- Notre « logiciel » qui permettrait d'avoir un diagramme (histogramme) 3D, ne prendrait en entrée que **3 données majeures** :
 - ✓ La *demande annuelle* en énergie électrique correspondant aux énergies que l'on souhaite considérer.
 - ✓ La part du *chauffage* considérée dans cette demande d'électricité. On considèrera que cette part de la consommation peut être totalement enlevée de la consommation, et c'est ce que fait le laboratoire Energitecture, car pour eux, cette partie de la consommation *ne sera plus gérée par le réseau électrique* mais autrement.
 - ✓ La *part de la consommation facilement déplaçable*, en imposant quelques normes et en changeant les mentalités.

Dans notre cas, nous prendrons les chiffres suivants⁸ :

- ✓ Une **consommation** correspondant à la **production de photovoltaïque de 1099 GWH/an**⁹.
- ✓ Une **consommation** correspondant à la **production d'hydroélectrique de 783 GWH/an**¹⁰.

⁷ Voir la méthode de simplification plus loin

⁸ Bien sûr ceux-ci sont modifiables très simplement sur le document « Consommation électrique »

⁹ Source : document « schéma évolution énergie »

¹⁰ Source : document « schéma évolution énergie »

- ✓ Une utilisation de ces ressources à retirer pour cause d'utilisation de **chauffage de 351 GWh/an**. En effet, on sait que pour 2252 GWh/an (aujourd'hui), il y a 420 GWh/an qui est consacré au chauffage, ce qui par règle de proportionnalité donne ce 351 GWh/an¹¹.
- ✓ Lors de notre dernière réunion, nous avions déterminé à **30%, le taux d'énergie sur une journée déplaçable** facilement.

Ainsi, ce sont les majeures hypothèses de calculs sur lesquelles nous nous sommes basés pour mener à bien notre projet. Cependant, le but de notre projet est de montrer que notre méthode d'étude est rapide et efficace pour voir si un projet est viable ; et donc, en ce qui concerne la production, il est très facile dans le logiciel Excel de changer certains paramètres numériques.

Cependant, les approximations générales expliquées dans ce paragraphe, ainsi que dans les suivants sont plus durs à changer, car ces simplifications changent les formules théoriques et donc toute la structure de calcul.

¹¹ Source : document « estimation des besoins futurs de la métro »

1.2. Calculs et autres approximations

1.2.1. Détermination du graphe sans considérer le déplacement de consommation dans le temps sur la journée

Dans ce cas, le graphe ne sera qu'une relation de proportionnalité avec les données du RFE.

Voici les étapes du calcul :

1. Réduire chaque mois à un jour moyen, toujours en puissance, en faisant $\frac{1}{4} * \text{conso}(5) + \frac{1}{2} * \text{conso}(15) + \frac{1}{4} * \text{conso}(25)$. En effet, le 15 de chaque mois doit être en moyenne le plus représentatif du mois. Cependant, pour être un peu plus précis dans notre modèle, nous avons aussi voulu considérer aussi le 5 et le 25 de chaque mois avec un coefficient 2 fois moins grand pour uniformiser la valeur sur chaque mois.
2. Passer du tableau puissance en énergie : on considère que sur chaque $\frac{1}{2}$ heure, la puissance reste constante sur cette demi-heure. Si on veut rester en heure, il suffit de multiplier tous les nombres par $\frac{1}{2}$.
3. Pour avoir les résultats heure pas heure, il suffit de faire la moyenne sur chaque heure.
4. Pour chaque jour « modèle » de chaque mois, il suffit de déterminer le pourcentage que chaque heure par rapport à chaque jour¹².
5. Pour chaque mois, nous calculons la partie de consommation en % de chaque mois sur toute l'année.
6. Il suffit de multiplier les pourcentages obtenus par la demande par an¹³.

¹² On fait bien sûr la valeur sur la valeur totale de la journée

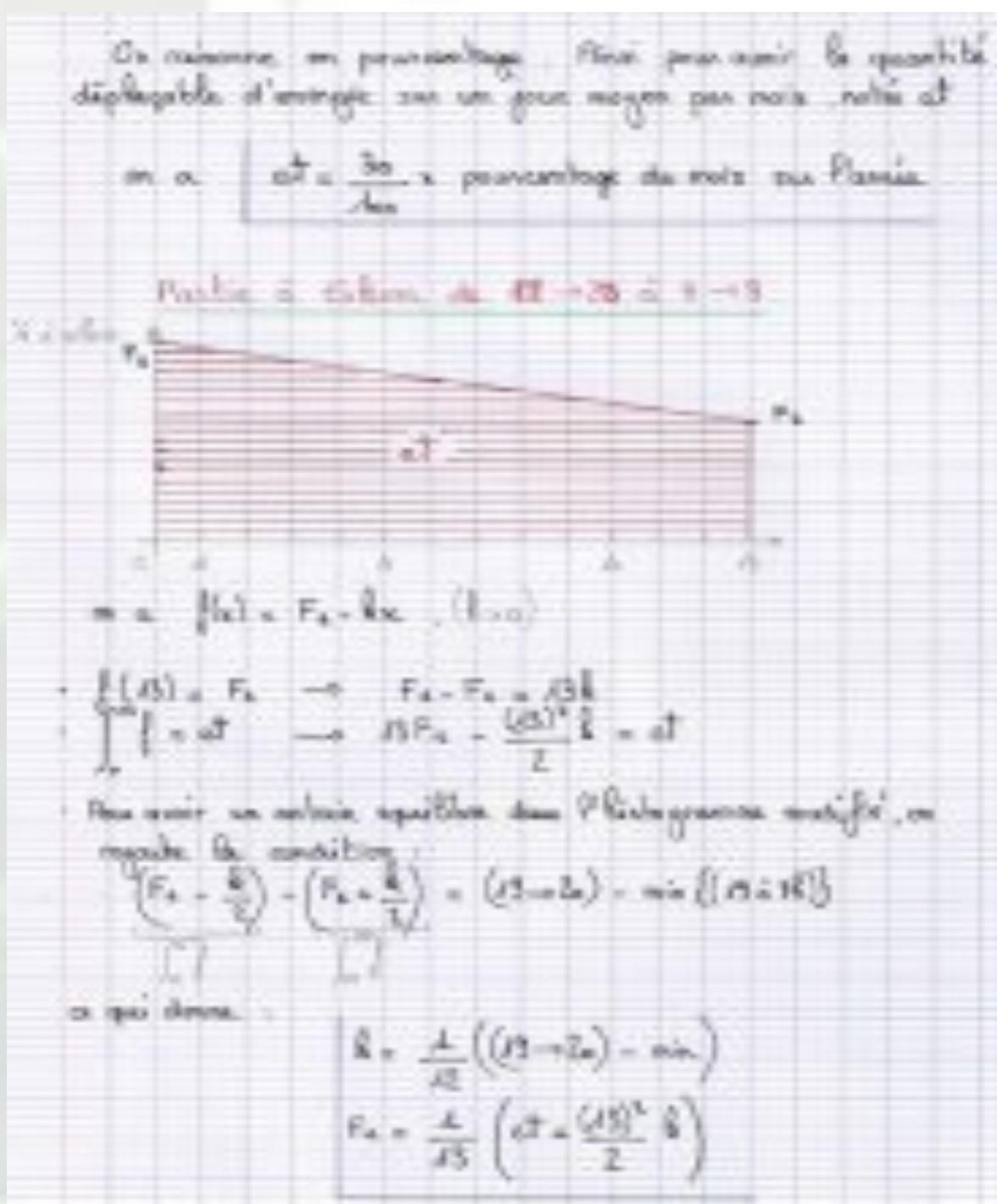
¹³ Il faut diviser par 30 en considérant qu'en moyenne, un mois est composé de 30 jours

1.2.2. Détermination du graphe en considérant le déplacement de consommation dans le temps sur la journée

On considère le tableau en pourcentage obtenu dans la partie précédente. On va enlever des pourcentages de 19h à 5h suivant une certaine relation logique.

On va en rajouter de 10h à 15h par une autre relation.

Cette partie ayant beaucoup de calcul, nous l'avons écrite en manuscrit :



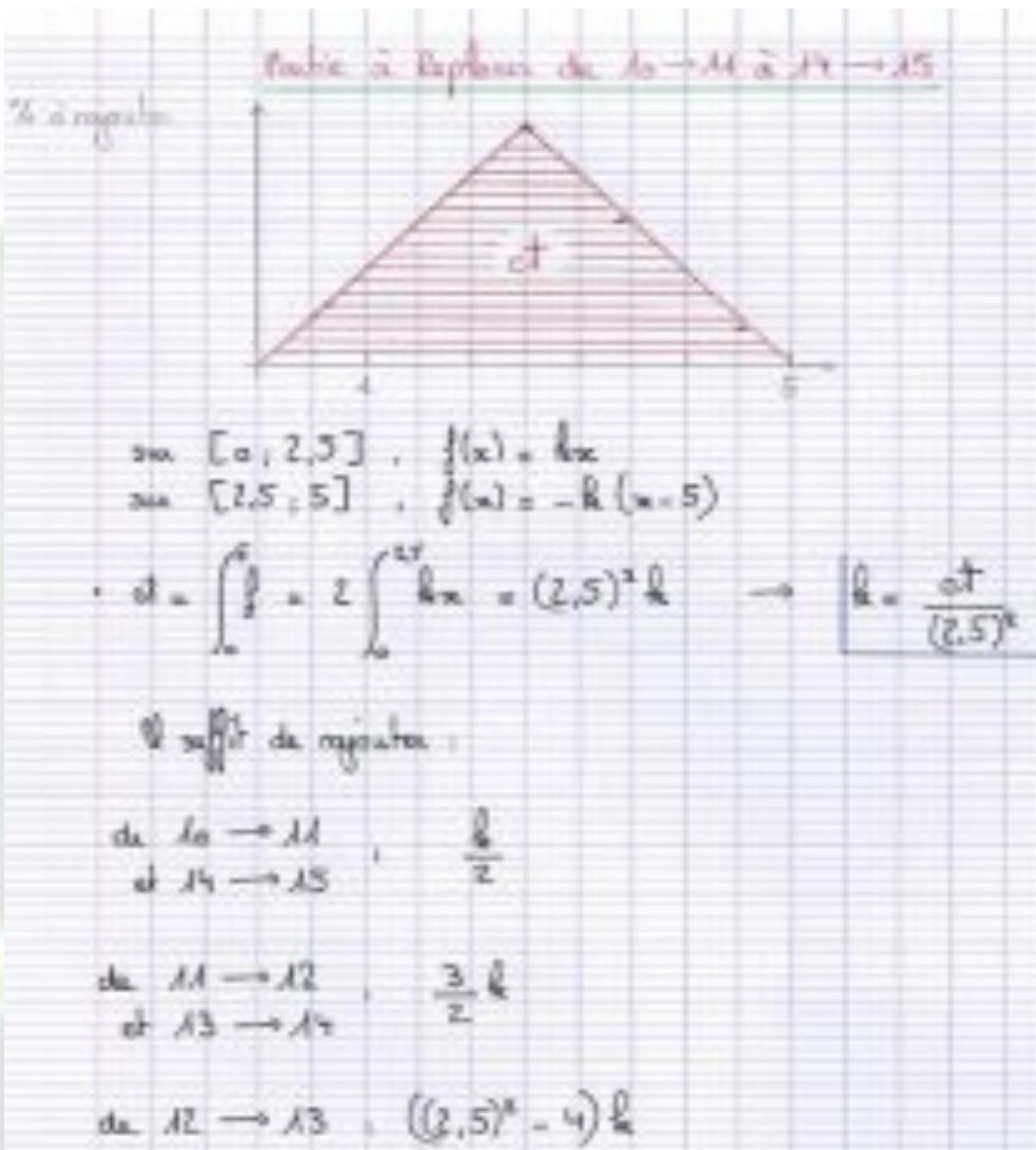
À chaque heure, il suffit d'enlever $\int_0^{\ell_{i+1}} f$
 ce qui donne pour ($i \rightarrow i+1$) , on enlève : $F_A = \frac{(2i+1)}{2} h$

Ainsi : on enlève :

$$19 \rightarrow 20 : F_A - \frac{h}{2}$$

$$20 \rightarrow 21 : F_A - \frac{3h}{2}$$

$$7 \rightarrow 8 : F_A - \frac{25h}{2}$$



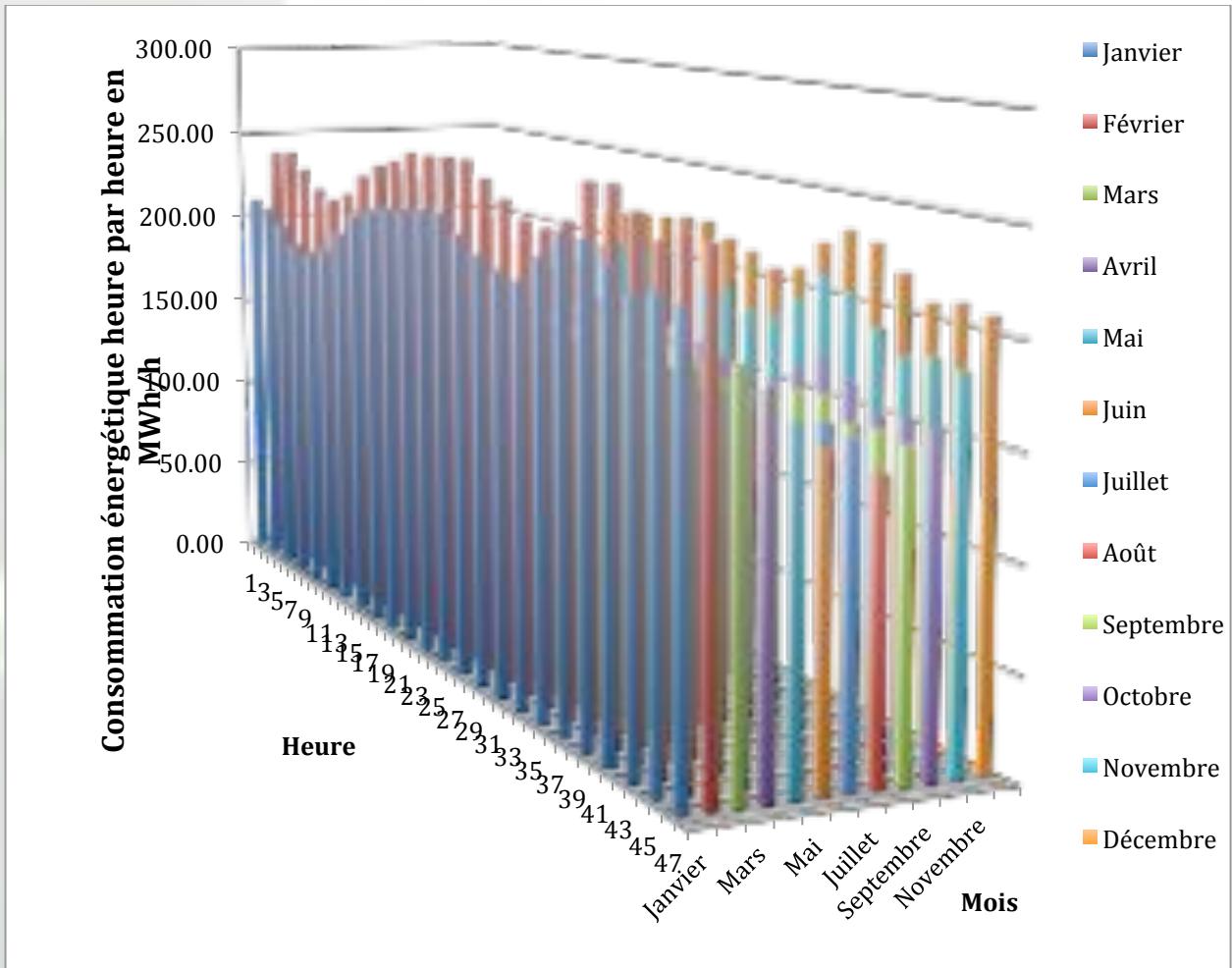
Ainsi, on retrouve un tableau de pourcentage modifié qu'il faut multiplier par la consommation considérée, puis diviser le tout par 30 et par 100.

1.3. Conclusion intermédiaire

Nous avons donc obtenu le logiciel qui nous permet en rentrant, une demande (décomposée en hydroélectrique et photovoltaïque), une partie de chauffage à retirer et un pourcentage déplaçable, d'obtenir 2 histogrammes 3D :

- ***Un non modifié par rapport à aujourd'hui***

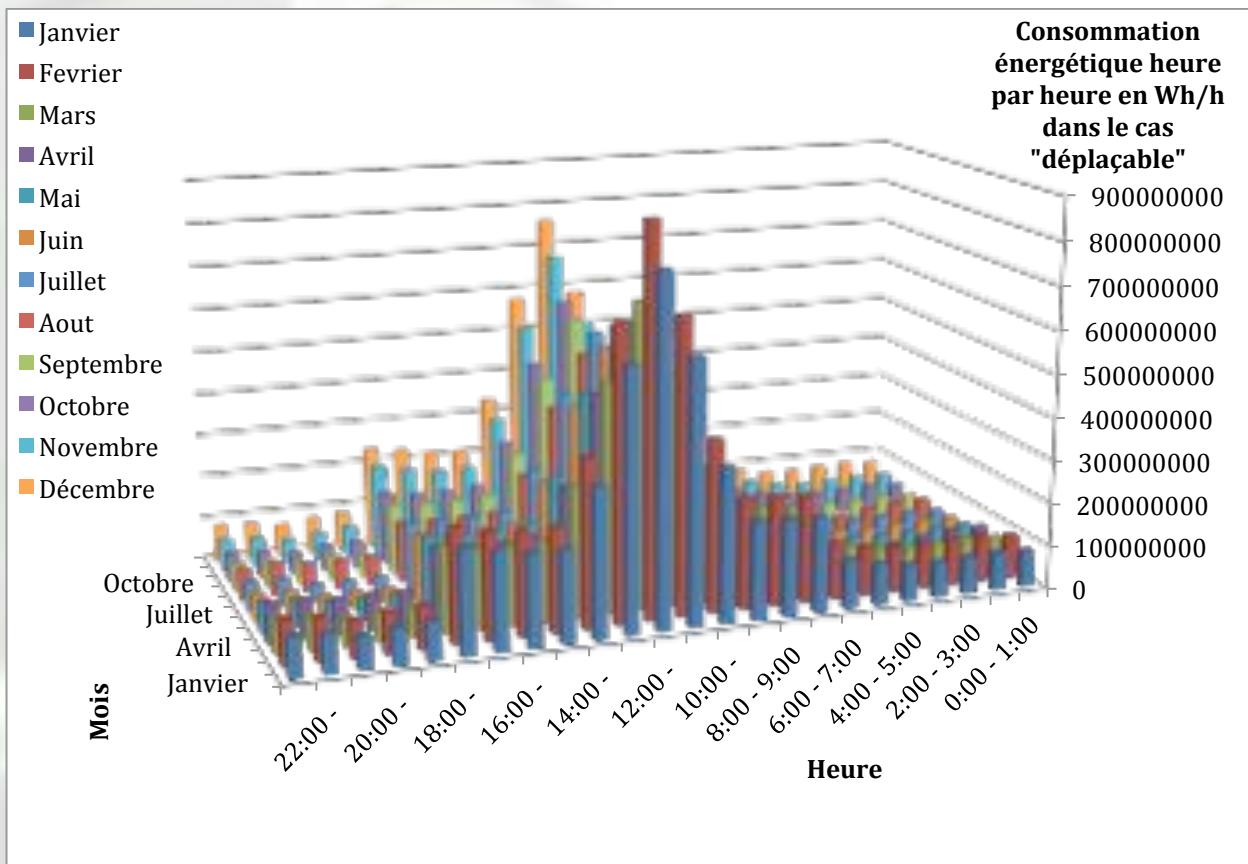
Il considère les énergies que nous allons prendre en compte et ne tient compte que de Grenoble.



Consommation énergétique heure par heure en MWh/h

- ***Un modifié***

Et c'est sur ce graphique que nous allons travailler pour les plans de stockage. On voit tout de suite que ce diagramme va être plus facile à traiter que le précédent, bien qu'il reste encore de la demande pendant la nuit, uniquement gérable avec le stockage et l'hydroélectrique. La seule question qui reste à se poser et qui est très importante pour la suite : Est-il réellement possible de déplacer si facilement 30% de la demande quotidienne là où cela nous arrange ?



**Consommation énergétique heure par heure en Wh/h
dans le cas "déplaçable"**

Partie 2

La production électrique

2.1. La production électrique photovoltaïque

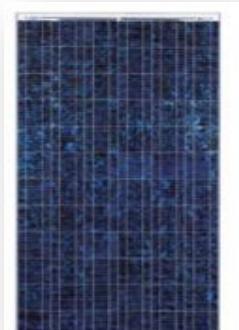
Le but de cette partie est de vous présenter la méthode de réalisation du graphe de production des panneaux solaires à partir des données recueillies sur le site de LGM¹⁴.

2.1.1. La centrale du LGM comme référence

Dans la mesure où les données sur lesquelles nous allons nous baser sont issues de la production d'une centrale en particulier, il est important de décrire cette centrale afin de comprendre les principales caractéristiques de son implantation telles que l'inclinaison des plans des panneaux où encore la présence de panneaux solaires-verrière ne captant que 60% du rayonnement.

La centrale du LGM a été construite dans le cadre de la prolifération des travaux pédagogiques autour du développement durable du Lycée Grésivaudan à Meylan dans l'agglomération de Grenoble. Elle est basée sur une installation de 400 m² de panneaux type BP3160¹⁵ dont les principales caractéristiques sont :

- **Rendement de 12,7% (silicium polycristallin)**
- **Puissance nominale = 160 W**
- **Surface du panneau = 1,2 m²**
- **Poids = 15kg**



La production de l'ensemble de ces panneaux est renvoyée sur 13 onduleurs¹⁶. Cependant, les 13 onduleurs ne sont pas répartis selon le type de panneau utilisé (inclinaison et orientation) qui nous empêche de faire des graphes séparés selon un type de panneau.

Néanmoins, l'installation référence est la suivante :

¹⁴ <http://solaire.lgm.ac-grenoble.fr/>

¹⁵ <http://download.solarshop.net/francais/uploads/bp3160.pdf>

¹⁶ Un onduleur est un dispositif d'électronique de puissance permettant de délivrer des tensions et des courants alternatifs à partir d'une source d'énergie électrique continue

- **La pose sur terrasse :** 75 m² de panneaux solaires sont fixés sur des consoles en plastique rigide et posés sur les graviers des terrasses. Leur inclinaison par rapport au sol est de moins de 30°. Les panneaux solaires placés en terrasses présentent une puissance de 9,6 kWc environ.
- **La surimposition sur toit ou pan incliné :** 208 m² de panneaux solaires sont superposés aux grands pans inclinés Est et Ouest de la façade et sur les 4 sheds situés au dessus de l'aile Nord. Leur inclinaison est de 45° environ. Les panneaux solaires en surimposition présentent une puissance de 26 kWc environ.
- **La verrière photovoltaïque :** Une verrière photovoltaïque a été posée en remplacement de l'ancienne verrière du centre de documentation et de ses volets défectueux qui équipaient le pan incliné central de la façade¹⁷.

Cela représente en tout une surface vitrée photovoltaïque de 100 m² environ. La verrière présente une puissance de 9 kWc environ.



¹⁷ Il est de même pour le bas du pan incliné Ouest qui constitue la verrière de la salle A124.

2.1.2. Méthode de calcul

2.1.2.1. L'acquisition des données

Afin d'obtenir un graphe, nous allons premièrement regarder comment sont obtenues les mesures. Un système d'acquisition de données, aussi appelé « datalogger » interroge périodiquement les onduleurs et les capteurs présents sur le réseau. Toutes les 15 minutes, à l'aide d'un logiciel de contrôle, il stocke les informations en ajoutant une ligne dans un tableau Excel.

Différentes données sont stockées (température ambiante, température cellules, éclairement, puissance et énergie des onduleurs, etc.). Dans notre cas, les grandeurs qui nous intéressent sont les puissances fournies des 13 onduleurs. Voici alors la forme des données obtenues :

Date	Puissance [W]	IG 1	IG 2	IG 3	IG 4	...	IG 12	IG 13
01/01/11 09:15	0	0	0	0	0	...	11,7	8,03
01/01/11 09:30	0,06	0,04	0,33	0,08	...	45,8	39,47	
01/01/11 09:45	0,14	2,31	7,42	4,06	...	88,1	86,04	
01/01/11 10:00	21,3	28,81	37,38	28,95	...	114	111,68	
01/01/11 10:15	28,59	34,34	42,4	33,81	...	134,02	132,97	

2.1.2.2. Conversion puissance énergie

L'une des parties de notre travail consiste selon la demande du client à normaliser notre production : il faut ramener la valeur de la production annuelle réalisée sur la centrale à celle attendue, soit **170kWh/m²/an.**

Calculons d'abord la production annuelle effective. Pour cela, il nous faut obtenir la valeur de la production totale d'énergie de la centrale à partir des données en puissance. Sommons tout d'abord la puissance totale reçue par les 13 onduleurs. Cette puissance étant obtenue pour toute la centrale LGM, ramenons-nous à la puissance surfacique en divisant par $S=400\text{m}^2$. Il faut ensuite intégrer cette puissance au sens mathématique. Pour cela nous réalisons une intégration par la méthode des rectangles qui consiste à estimer par des aires de rectangles l'aire sous la courbe, c'est à dire l'intégrale.

On réalise une intégration de la puissance en la supposant constante sur 15min (temps entre deux mesures) et en la multipliant par les 900s de ce quart d'heure (Intégration par la méthode des rectangles avec pas de 15 min). On obtient ainsi des joules à ramener en watt heure, soit une production effective de **151 kWh/m²/an.**

Nous trouvons ainsi le rapport

$$\alpha = \frac{\text{production attendue}}{\text{production effective}} = 1.12$$

On utilise le rapport pour calculer la puissance surfacique normalisée.

A ce stade, nous avons :

Date	Puissance Totale (W)	Puissance Surfacique (W/m ²)	Energie en 15min Surfacique (kJ/m ²)	Puissance Surfacique normalisée (W/m ²)
01/01/11 09:15	21,24	0,0531	0,000013275	0,059737009
01/01/11 09:30	224,34	0,56085	0,000140213	0,630951067
01/01/11 09:45	583,96	1,4599	0,000364975	1,64237401
01/01/11 10:00	898,38	2,24595	0,000561488	2,526672996
01/01/11 10:15	1032,9	2,58225	0,000645563	2,905007389

2.1.2.3. Obtention du graphe

Nous cherchons à obtenir les données de production pour un jour moyen dans le mois, ce dernier étant décrit à chacune de ces heures. Afin d'y parvenir nous allons en fait réaliser une moyenne de production mensuelle par tranche horaire pour ensuite l'attribuer à la tranche horaire du jour moyen.

Théoriquement, nous nous donnons en premier lieu l'ensemble des tranches horaires d'une heure [00h;1h],[1h;2h]...

Nous connaissons par ailleurs le relevé de la puissance de la centrale tous les quarts d'heure durant un an, ce qui constitue un surplus d'information par rapport à ce que nous cherchons à obtenir (une évaluation de la puissance à chaque heure).

Nous réalisons donc la moyenne arithmétique sur les 4 quarts d'heure de chaque tranche horaire et nous faisons l'hypothèse que cette moyenne constitue la valeur de la puissance moyenne sur toute la tranche horaire : on a en quelque sorte discréétisé notre signal pour en faire la moyenne, cela revient à faire une intégration par la méthode des rectangles. C'est ce qui justifie notre hypothèse.

Dans la pratique, notre tableau des données a actuellement 35 040 lignes. Le faire manuellement serait très fastidieux et prendrait un temps considérable. Afin d'automatiser cette procédure, nous utilisons les macros d'Excel.

Sub Average()

```
For i = 1 To 365
```

```
For n = 1 To 24
```

```
    Cells(i , n).Select
```

```
    ActiveCell.FormulaR1C1 = "=AVERAGE(R[" & 4 * (n - 1) + (i - 1) * 4 * 24 - (i - 1) & "]C[" & -4 - n & "]:R[" & 4 * (n - 1) + 3 + (i - 1) * 4 * 24 - (i - 1) & "]C[" & -4 - n & "])"
```

```
Next n
```

```
Next i
```

```
End Sub
```

Désormais, les données sont rangées dans un tableau du type :

Production PV (en W/m ²)	07:00	08:00	09:00	10:00	11:00	12:00	13:00
01/01/11	0	0	0,583265522	3,745326268	10,15250723	12,46183905	9,45824028
02/01/11	0	0	0,117442004	1,911183521	2,45740169	3,213057983	3,843791084
03/01/11	0	0	0,296308504	2,390914736	6,282405429	15,22740383	16,69149493
04/01/11	0	0	0,151233914	6,065950175	20,12500188	34,58191361	31,65259939
05/01/11	0	0	2,535651829	12,6595632	22,07591867	34,99129071	30,26613265

Chacune de ces valeurs est donc la puissance surfacique moyenne générée sur une heure d'une journée du mois, et il faut donc encore se ramener par moyenne à la valeur moyenne de puissance pour une journée type du mois.

Comme précédemment en réalisant la moyenne arithmétique de toutes les puissances d'une tranche horaire [h,h+1] sur toute les journées du mois, nous obtenons le tableau souhaité.

Code macro :

```
Sub Tableau_final()
Range("A1").Select
ActiveCell.FormulaR1C1 = "(en W/m2)"
Range("B1").Select
ActiveCell.FormulaR1C1 = "0:00"
Selection.AutoFill Destination:=Range("B1:Y1"), Type:=xlFillDefault
Range("A2").Select
ActiveCell.FormulaR1C1 = "Janvier"
Selection.AutoFill Destination:=Range("A2:A13"), Type:=xlFillDefault

'Pour Janvier (de même pour les autres mois)
Range("B2").Select
ActiveCell.FormulaR1C1 =_
    "=AVERAGE('année2011_Système complet.xls'!R[2]C[2]:R[32]C[2])"
Selection.AutoFill Destination:=Range("B2:Y2"), Type:=xlFillDefault

Range("A1:Y13").Select
ActiveSheet.ListObjects.Add(xlSrcRange, Range("$A$1:$Y$13"), , xlYes).Name = _
    "Table1"
ActiveSheet.ListObjects("Table1").TableStyle = "TableStyleLight2"

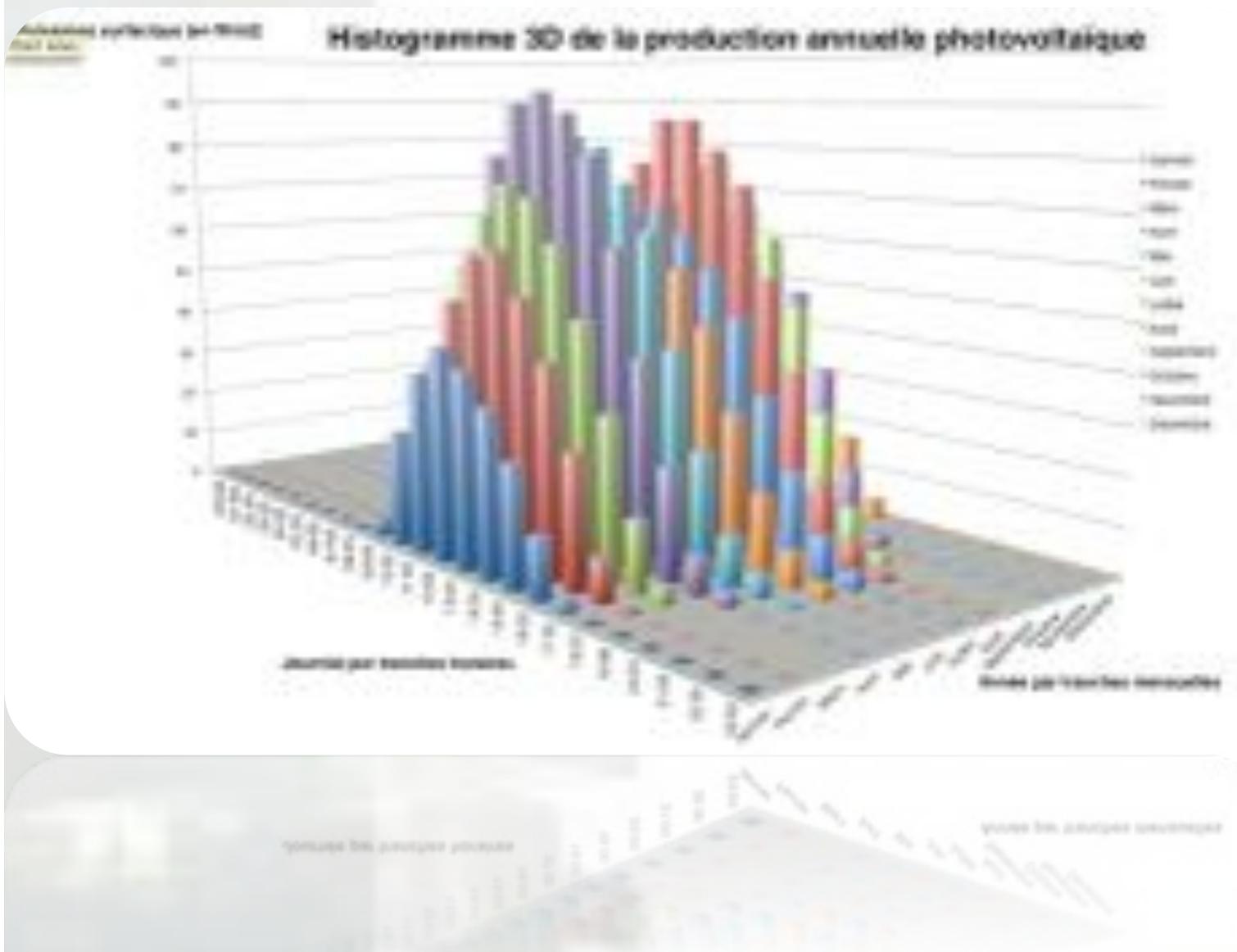
End Sub
```

Tableau final :

(en W/m2)	06:00	07:00	08:00	09:00	10:00	11:00
Janvier	0	0	0,005277704	3,711630073	23,40733707	36,62437992
Février	0	0	0,52403978	12,84714336	37,05499084	50,79869835
Mars	0	0,428254723	11,58319518	35,14418807	56,56307358	67,75638779
Avril	0,270703245	9,123406937	33,78440789	59,30615943	79,21345428	90,11301912
Mai	2,448443044	17,15557948	39,19042351	63,36304031	76,19821412	84,79052338
Juin	0,732971323	6,661220989	20,68803562	38,30841011	53,01934826	64,27786508
Juillet	0,360624407	5,948524048	22,69979636	38,72002269	51,60636497	62,74695568
Août	0,006930487	2,599389133	19,04618428	42,56194052	63,97029172	77,13452941

Septembre	0	0,206212212	10,51700987	36,2155898	55,27808361	68,3014025
Octobre	0	0	0,944288438	17,94799892	40,71859848	56,73797562
Novembre	0	0,020441316	3,863102488	26,60403249	44,98343497	53,69013126
Décembre	0	0	0,251946217	7,3321867	20,03015813	28,42771312

Nous en déduisons l'histogramme 3D de la production photovoltaïque de l'année 2011 :



2.1.3. Analyse du graphe

Grâce à ce nouvel outil visuel, nous pouvons obtenir plus d'informations sur les données d'acquisition. Le format est plus clair, plus lisible et permet de comparer instantanément

les valeurs avec la présence de 3 axes.

Le graphique obtenu est le plus réaliste possible puisqu'il est directement tiré de relevés effectués à Grenoble durant l'année la plus proche de la nôtre. Cependant, on réalise qu'en se basant non plus sur les données de l'année dernière seulement mais sur celles de plusieurs années antérieures, on obtiendrait un graphique encore plus général ne dépendant pas des conditions météo particulières observées en 2011 (très beaux mois de avril-mai-juin et mois de juillet août moins ensoleillés). Le contenu serait alors plus général et tels seraient les plans de gestion qui en découleraient.

D'autre part, il est important de remarquer que l'installation de référence date de 2004 et les technologies ont évolué sur différents paramètres et permettent désormais de capter de l'énergie à partir d'un rayonnement moins intense et ainsi démarrer la production plus tôt dans la journée, mais aussi d'augmenter la quantité d'énergie globalement produite.

En ce qui concerne le graphe lui même, on remarque tout d'abord que la forme générale du graphe était attendue :

- La majeure partie de la production se fait aux alentours de 14h pour chaque mois de l'année, on imagine alors déjà qu'il faudra stocker une partie de cette surproduction pour la restituer plus tard dans la journée ;
- La production est plus importante sur les mois de l'été (le graphique basé sur les données de 2011 est trompeur à cause de la météo particulière de cette année), ce qui implique un stockage saisonnier si l'on désire minimiser la surface de panneaux photovoltaïques utilisée.

Au final, le graphe proposé peut être encore amélioré en utilisant des méthodes statistiques plus poussées et en prenant plus de valeurs en compte.

2.2. La production hydroélectrique

2.2.1. Choix de la turbine en fonction de la rivière

Pour calculer l'énergie hydraulique que peut produire une seule turbine, on a dû choisir un type de turbine adapté à chaque rivière selon son débit et la hauteur de chute estimée.

Les valeurs qui ont servi à choisir la turbine sont :

- Le débit moyen du Drac sur l'année est : $67,5\text{m}^3/\text{s}$
- Le débit moyen de l'Isère sur l'année est : $20\text{m}^3/\text{s}$
- La hauteur estimée de la chute dans les centrales hydrauliques est : 1,5m

La turbine **Kaplan** est la plus appropriée, car elle est idéale pour les faibles et moyennes chutes à forts débits. Cela dit, il nous faut choisir le modèle adéquat à chacune des deux rivières.



- C'est pour cela qu'on prend pour le **Drac** le modèle **GDSK114-WS-400**¹⁸, dont le rendement mécanique est $\eta_t=86\%$, car il est parfait pour des débits proches de $65\text{m}^3/\text{s}$.
- Et, pour l'**Isère**, on prend le modèle **GDSK114-WP-290**¹⁹ dont le rendement est $\eta_t=89,2\%$, puisqu'il est compatible avec les débits de $33,8\text{m}^3/\text{s}$. C'est deux modèles appartiennent à la société *Zhejiang Jinlun Electromechanic Co.*

On associe à la première Turbine l'alternateur **SFW80-16**¹⁸ avec un rendement $\eta_e=93,4\%$ ²⁰, et à la deuxième **SFW400-12**¹³ d'un rendement $\eta_e=92\%$ ¹⁴. Ces deux alternateurs appartiennent à la même société.

¹⁸ http://www.zjjl.com/products_detail/&productId=3f7c8c44-9721-43cd-ba42-54a29861ece6&comp_stats=comp-FrontProducts_list01-1270686929120.html

¹⁹ http://www.zjjl.com/products_detail/&productId=12d02969-09c4-45c9-8f6a-539ec145f291&comp_stats=comp-FrontProducts_list01-1270686929120.html

²⁰ http://fr.made-in-china.com/co_njlewis/product_Hydro-Water-Turbine-Generator-Alternator-1430_hhyihsnnu.html

Ainsi, en utilisant les relations²¹ :

$$P_{hyd} = \rho * Q * g * H$$

$$\eta_t = P_{mec} / P_{hyd}$$

$$\eta_e = P_{elec} / P_{mec}$$

On trouve : $P_{elec} = \eta_e * \eta_t * \rho * Q * g * H$

avec, Q : Débit

H : Hauteur

On trouve l'énergie en Wh en divisant par 3600s.

Il existe environ 31 centrales hydroélectriques à Grenoble, dont 11 sont sur l'Isère et 20 sur Le Drac. Et on fait *l'hypothèse que chaque centrale possède une seule turbine*, ce qui nous donne la production totale estimée.

²¹http://www.bfe.admin.ch/php/modules/publikationen/stream.php?extlang=fr&name=fr_292139494.PDF

2.2.2. Etude du stockage

Notre barrage utilisera une hauteur de **1000 m**. Ceci nous pousse à choisir la **turbine Pelton** qui est la plus adéquate, donc en installer trois du même modèle qui est CJA475-W-115/1*5.5²² dont le rendement est $\eta_t=85,7\%$ ¹⁶. Chacune sera associée à l'alternateur SFW2500-6¹⁶ avec un rendement de $\eta_e=96,4\%$ ²³. On a choisi un débit de **Q=0,313m³/s**¹⁴, qu'on a trouvé dans le cas général de fonctionnement de cette turbine, et qui est très proche de la réalité dans un barrage.

En utilisant la relation précédente pour une seule turbine, et en multipliant par 3, on trouve une puissance **de P=7,62MW**. En calculant le débit que peut avoir l'eau dans sa chute à 1m au-dessus des turbines par la même relation, et en utilisant la puissance déjà trouvée, on obtient $Q_{1m}=940,2\text{m}^3/\text{s}$.

Selon la relation : $T=V/Q$ ²⁴, on peut savoir combien de temps il faut pour vider tout le réservoir dont le volume est $V_{max}=230.10^3 \text{m}^3$.

On trouve Ainsi $T = 68\text{h}$, c'est-à-dire qu'on **peut stocker jusqu'à 518,2 MWh**



Turbine Pelton

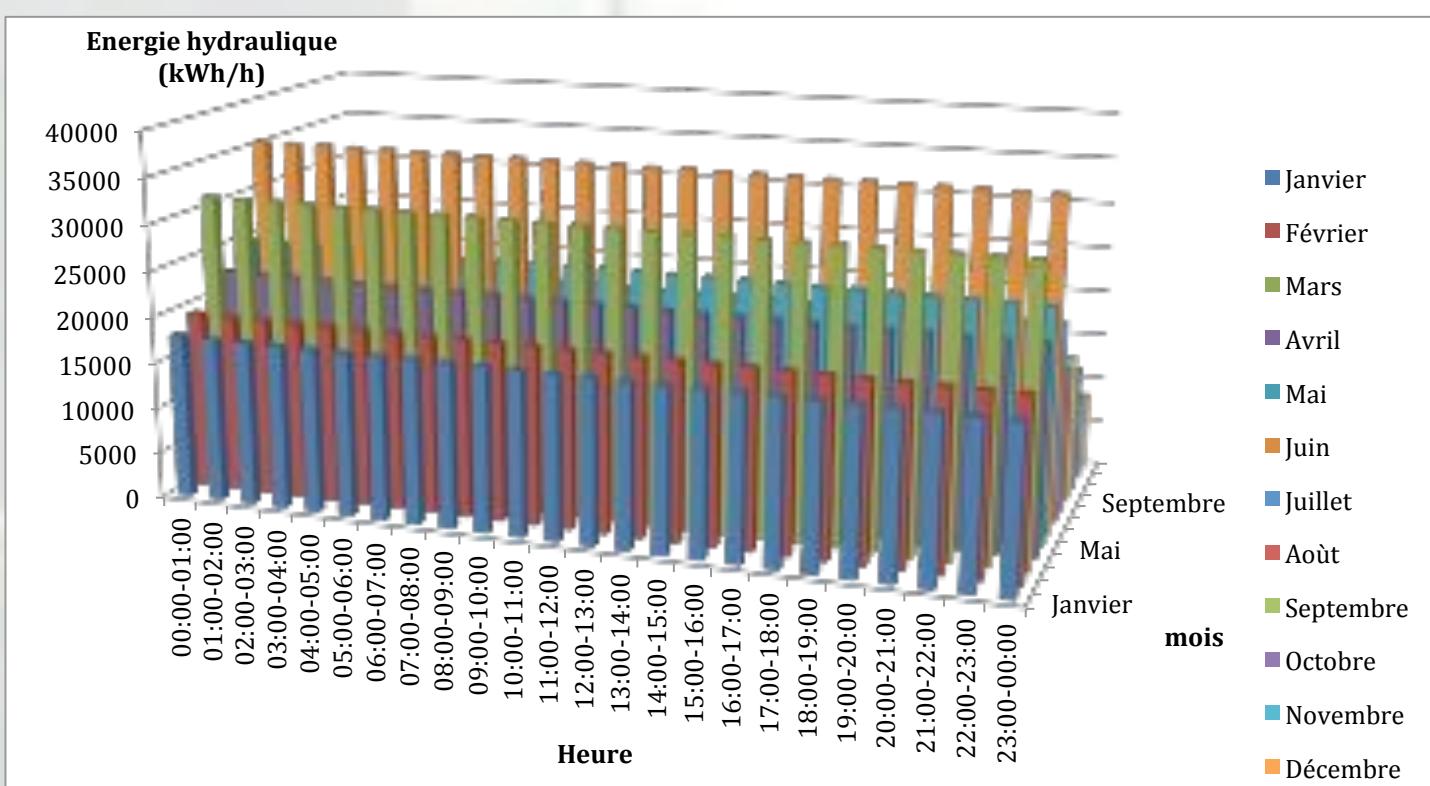
²² http://www.zjjl.com/products_detail/&productId=9bd03d75-1b33-4ec7-bc2c-9213f0406aee&comp_stats=comp-FrontProducts_list01-1270686929120.html

²³ http://fr.made-in-china.com/co_njlewis/product_Hydro-Water-Turbine-Generator-Alternator-1430_hhyihsnnu.html

²⁴ avec V est le volume de l'eau et T le temps d'écoulement

Tableau de production hydroélectrique à Grenoble

	janvier	février	mars	avril	mai	juin	juillet	août	septembre	octobre	novembre	décembre
ébit Isère (m ³ /s)	14,8	14,1	20,4	24,8	21,7	29	29,7	23,4	19,7	13,7	15,8	12
ébit Drac (m ³ /s)	63,2	69,6	114	75,7	88,5	126	69,3	50,1	51,9	46	28,4	26,8
production une seule turbine Kaplan modèle DSK114-WP-290 sur l'Isere (kWh/h)	178,7	170,3	246,3	299,5	262	350,2	358,6	282,6	237,9	165,4	190,8	521,6
production une seule turbine Kaplan modèle DSK114-WS-400 sur le Drac (kWh/h)	796,8	877,5	1437,3	954,4	1115,8	1588,6	873,7	631,6	654,3	580	358	337,9
production totale estimée (kWh/h)	17901,8	19423,4	31455,6	22382,3	25198	35624,4	21413,9	15740,8	15702,9	13419,3	9259,0	8351,6

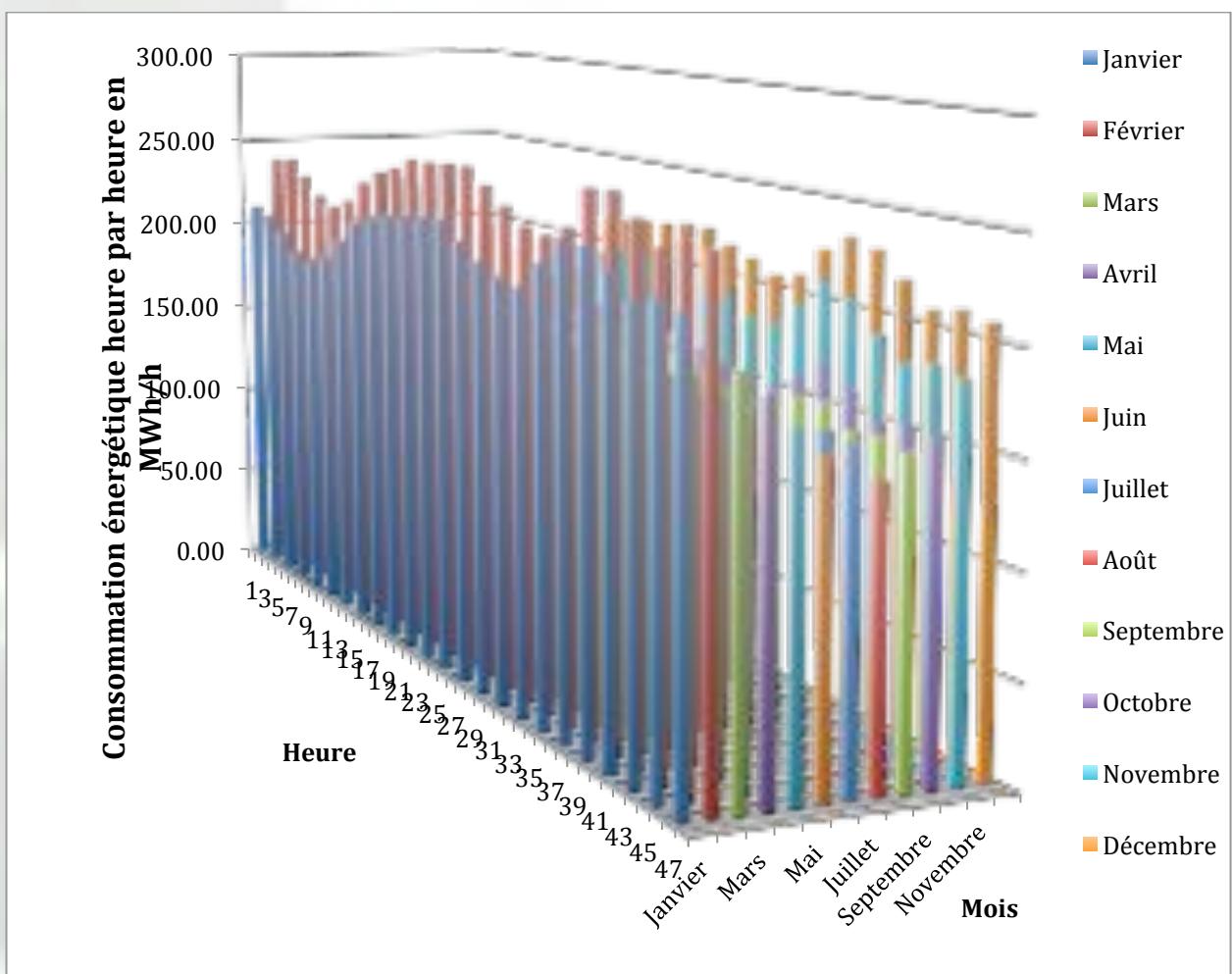


Partie 3

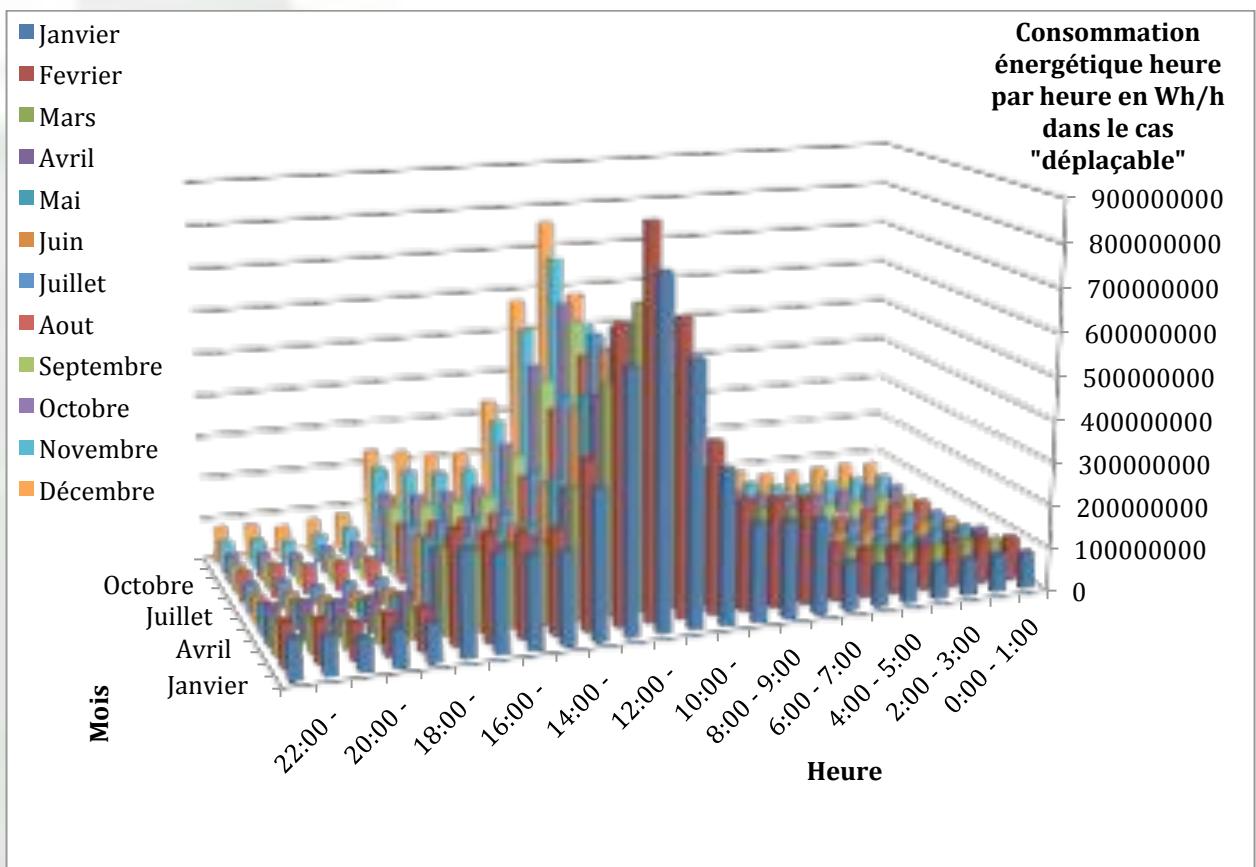
Les divers scénarios de mix électrique

3.1. Récapitulatif des divers tableaux et graphes

Consommation énergétique heure par heure en MWh/h

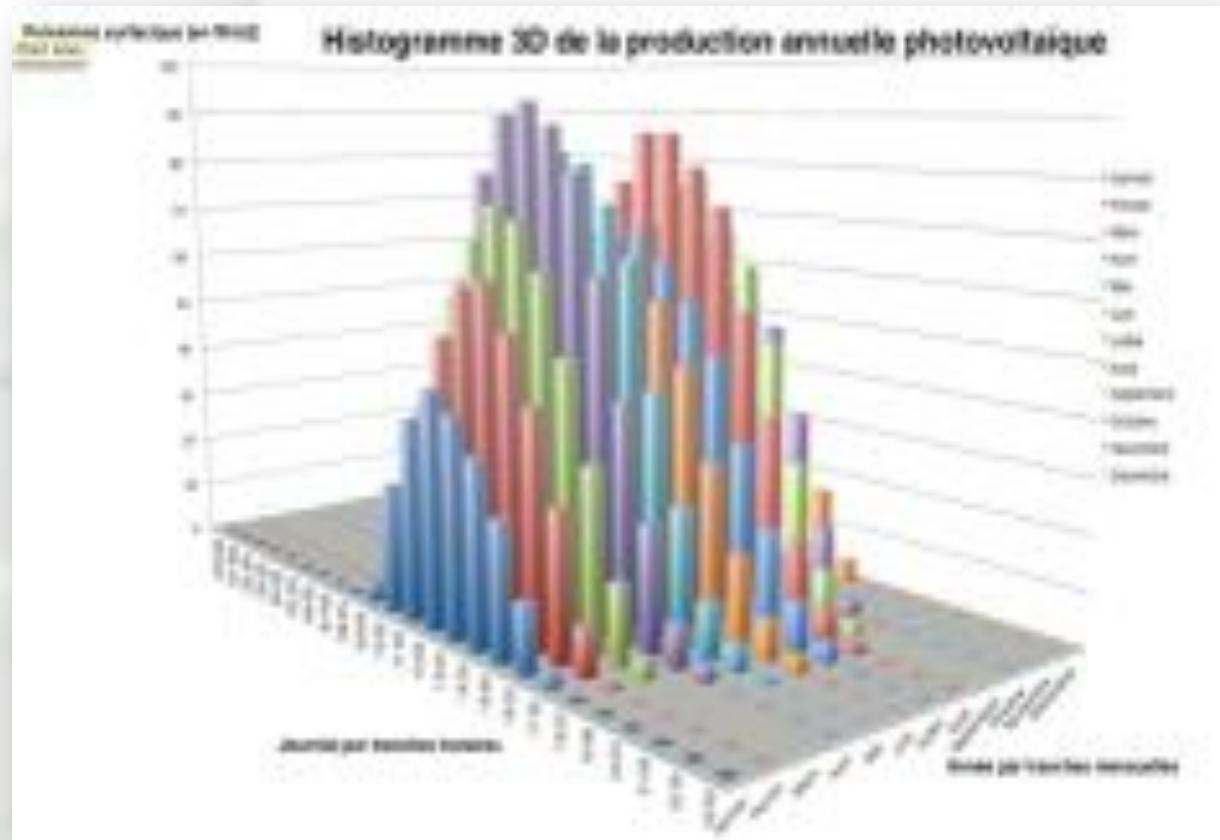


Consommation énergétique heure par heure en Wh/h dans le cas "déplaçable"



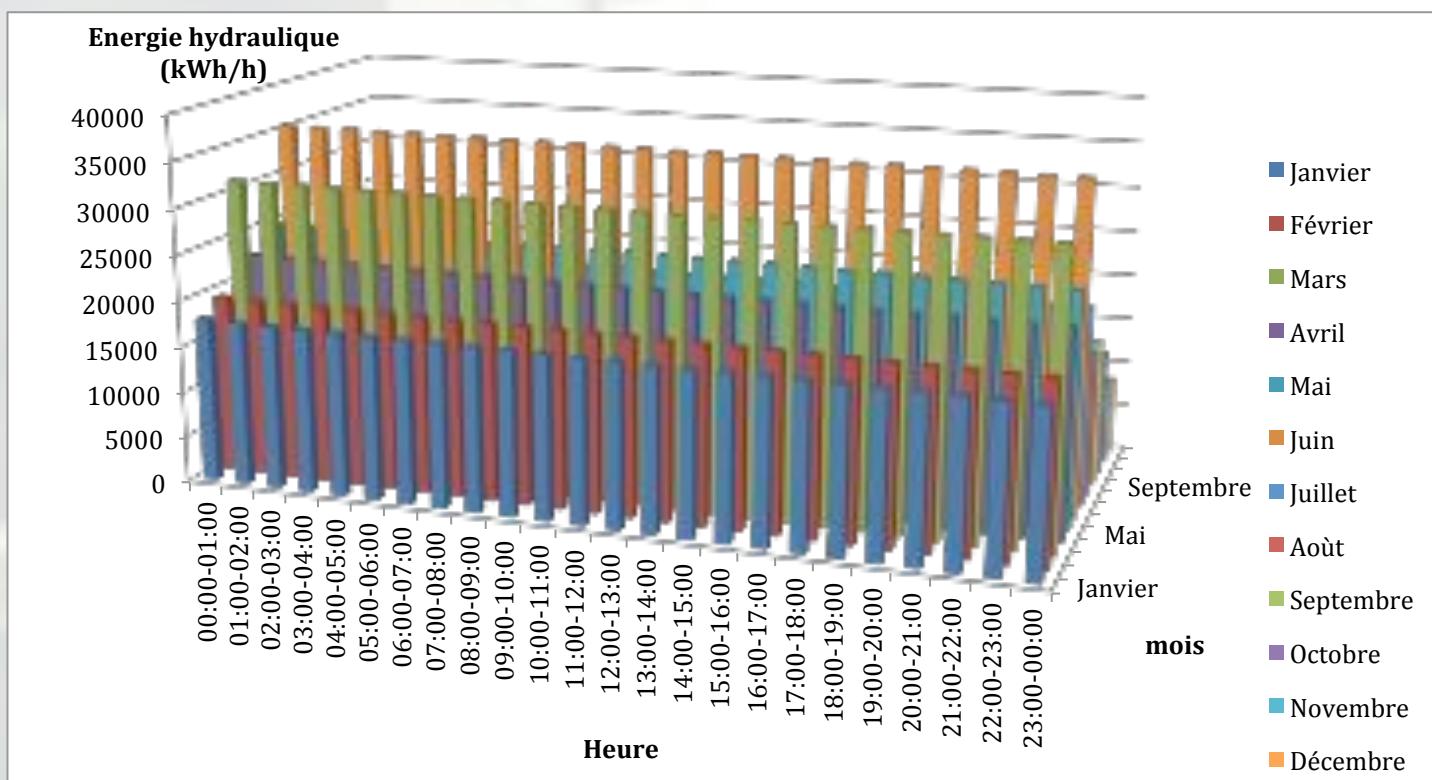
Production annuelle PV

(en W/m2)	06:00	07:00	08:00	09:00	10:00	11:00
Janvier	0	0	0,005277704	3,711630073	23,40733707	36,62437992
Février	0	0	0,52403978	12,84714336	37,05499084	50,79869835
Mars	0	0,428254723	11,58319518	35,14418807	56,56307358	67,75638779
Avril	0,270703245	9,123406937	33,78440789	59,30615943	79,21345428	90,11301912
Mai	2,448443044	17,15557948	39,19042351	63,36304031	76,19821412	84,79052338
Juin	0,732971323	6,661220989	20,68803562	38,30841011	53,01934826	64,27786508
Juillet	0,360624407	5,948524048	22,69979636	38,72002269	51,60636497	62,74695568
Août	0,006930487	2,599389133	19,04618428	42,56194052	63,97029172	77,13452941
Septembre	0	0,206212212	10,51700987	36,2155898	55,27808361	68,3014025
Octobre	0	0	0,944288438	17,94799892	40,71859848	56,73797562
Novembre	0	0,020441316	3,863102488	26,60403249	44,98343497	53,69013126
Décembre	0	0	0,251946217	7,3321867	20,03015813	28,42771312



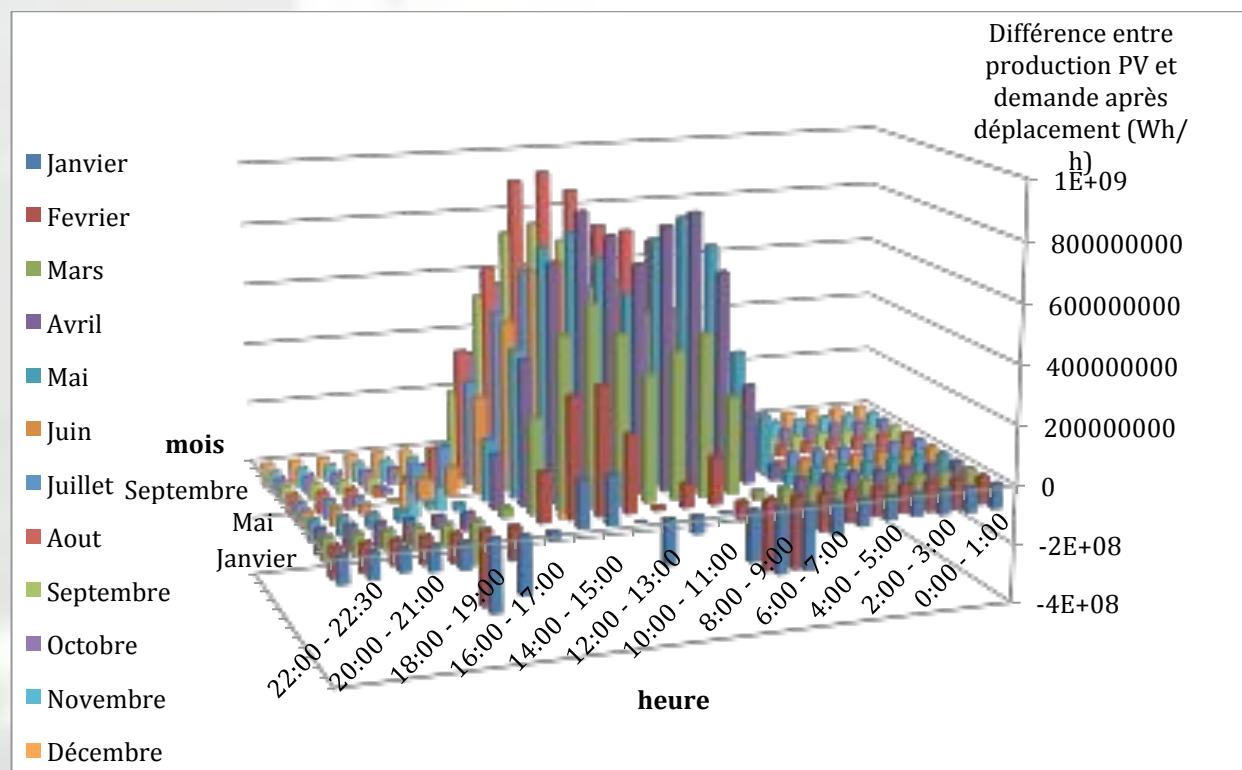
Production hydroélectrique à Grenoble

	janvier	février	mars	avril	mai	juin	juillet	août	septembre	octobre	novembre	décembre
ébit Isère (m ³ /s)	14,8	14,1	20,4	24,8	21,7	29	29,7	23,4	19,7	13,7	15,8	12
ébit Drac (m ³ /s)	63,2	69,6	114	75,7	88,5	126	69,3	50,1	51,9	46	28,4	26,8
production une seule turbine Kaplan modèle DSK114-WP-290 sur l'Isère (kWh/h)	178,7	170,3	246,3	299,5	262	350,2	358,6	282,6	237,9	165,4	190,8	521,6
production une seule turbine Kaplan modèle DSK114-WS-400 sur le Drac (kWh/h)	796,8	877,5	1437,3	954,4	1115,8	1588,6	873,7	631,6	654,3	580	358	337,9
production totale estimée (kWh/h)	17901,8	19423,4	31455,6	22382,3	25198	35624,4	21413,9	15740,8	15702,9	13419,3	9259,0	8351,6



3.2. Représentation de la différence entre la production et la consommation - Stockage

On choisit une surface de 15 m² de panneaux photovoltaïques, donc on multiplie les valeurs de production d'1 m², qui sont dans le tableau de l'Excel, par 15×10^6 . On obtient ainsi la production photovoltaïque globale dont on soustrait la demande en énergie à chaque heure de la journée, ce qui nous donne la courbe suivante :



Différence entre production PV et demande après déplacement (Wh/h)

La demande dépasse la production vers le début et la fin de l'année, ce qui est le contraire pour les mois de Mars jusqu'à Septembre. Pour équilibrer, il faut stocker pendant les mois de forte production et déstocker pendant le début et la fin de l'année.

A l'échelle de la journée, il y a de fortes discontinuités de production entre 7:00 et 10:00, et entre 19:00 et 21:00. Ainsi, il faut prévoir un stockage à court terme pour mieux répartir le surplus de production, et l'étaler le long de la journée.

3.3. Plan de stockage avec un hypothétique stockage saisonnier

Bien qu'aujourd'hui, le stockage saisonnier, comme nous l'avons vu dans nos études précédentes, est encore au stade d'embryon, il aurait été logique d'arrêter la recherche dans cette axe pour l'instant. Cependant, il est vrai, comme nous l'a fait remarqué un des membres de la commission d'Energitecture, que nous ne nous sommes pas vraiment posés la question car cette problématique n'est que très récente. Ainsi, avec des batteries qui peuvent déjà durer un mois sans trop de pertes énergétiques, on peut espérer que d'ici 2030 ou 2050, des batteries plus denses et qui durent plus longtemps, ou encore d'autres moyens de stockage aujourd'hui encore inexploités voient le jour.

C'est pourquoi nous avons décidé de faire, dans un esprit un peu futuriste mais aussi scientifique et rigoureux, un plan de stockage prenant en compte la possibilité d'un stockage saisonnier, c'est-à-dire supérieur à 9 mois. Nous avons donc plusieurs paramètres à trouver, en ayant un seul but : avoir un équilibrage de la production et de la consommation d'électricité sur l'année.

En revenant à nos tableaux et nos diagrammes 3D, il faut, en ces termes, si on fait la différence entre production et demande, avoir une intégrale nulle sous la surface 3D.

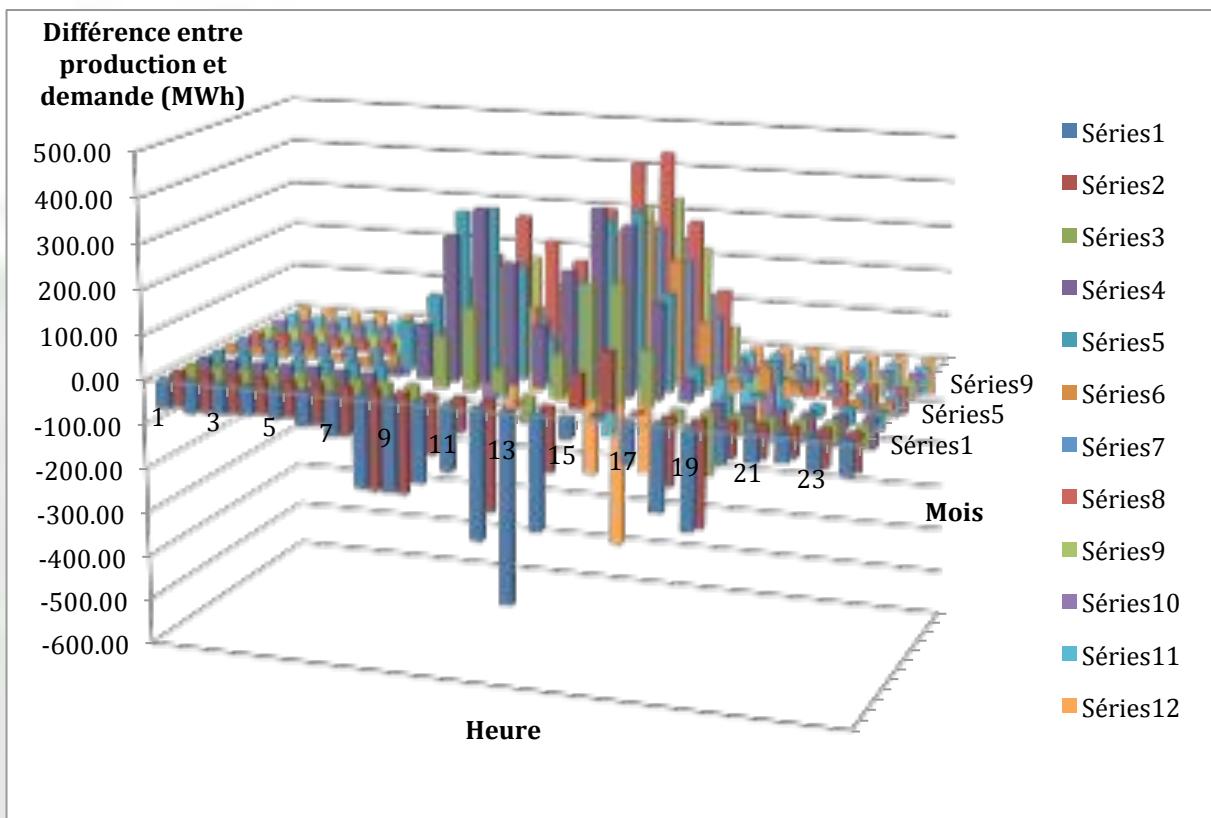
Remarque : nous considérerons que le barrage est assez important pour stocker de manière journalière et donc que le stockage saisonnier se fait par batterie « imaginaire » avec la même densité de stockage que des batteries d'aujourd'hui.

Nous n'avons, en fait, pas beaucoup de paramètres amovibles dans ce problème. Nous pourrions considérer de rajouter des turbines dans le Drac et l'Isère. Cependant, notre client nous a dit que ces fleuves étaient largement déjà assez exploités ; donc seul un renouvellement global des machines existantes augmenterait significativement la production hydroélectrique mais nous ne considérons pas ce problème.

Ainsi pour avoir, une intégrale nulle, il ne nous reste que la surface de panneaux photovoltaïques, car comme nous l'avons décidé dans la première partie, nous ne prenons en compte que deux énergies (PV et hydraulique).

Ainsi, en prenant les tableaux de la première partie, soit la demande modifiée (qui va en fait aider à minimiser quelque peu le stockage journalier), la production hydroélectrique et la production photovoltaïque (* la surface considérée). Par dichotomie, on trouve une surface d'environ 8 146 220 m² pour produire autant que l'on consomme sur l'année.

Voici le graphe de différence entre production et demande en considérant cette surface :



Remarque : Pour savoir que l'intégrale fait bien zéro, on fait la somme de toutes les barres de l'histogramme et ça doit faire zéro !

Dans ce cas, il nous reste à obtenir la capacité de stockage saisonnier. Pour cela, déterminons les mois où la production est plus forte que la demande sur la journée :

	Janvier	Février	Mars	Avril	Mai	Juin	Juillet	Août	Septembre	Octobre	Novembre	Décembre
0h-1h	-66.63	-78.66	-40.86	-53.49	-33.27	-18.46	-28.89	-41.69	-33.15	-42.87	-52.68	-65.25
1h-2h	-69.66	-85.41	-44.18	-50.41	-33.51	-18.59	-31.05	-38.11	-34.71	-43.98	-53.41	-68.30
2h-3h	-67.07	-83.04	-41.97	-42.53	-29.61	-15.02	-28.39	-29.87	-32.08	-40.44	-50.93	-65.74
3h-4h	-62.99	-78.58	-39.19	-34.31	-27.39	-12.60	-29.04	-23.29	-30.43	-38.13	-49.11	-62.17
4h-5h	-65.46	-79.95	-43.11	-31.79	-31.37	-15.68	-33.47	-21.95	-34.48	-41.53	-53.80	-65.40
5h-6h	-76.18	-90.76	-57.29	-37.35	-43.51	-22.81	-41.81	-24.66	-45.81	-52.80	-67.86	-78.50
6h-7h	-93.95	-108.00	-79.12	-45.45	-40.51	-27.93	-49.20	-28.03	-65.13	-72.03	-91.63	-100.60
7h-8h	-200.60	-225.59	-165.10	12.56	104.46	25.31	24.79	-26.30	-79.31	-95.51	-113.45	-152.06
8h-9h	-204.70	-225.86	-79.00	116.57	168.84	55.88	53.86	39.61	-56.32	-146.08	-158.33	-205.26
9h-10h	-178.25	-131.82	111.17	319.04	360.11	191.68	175.60	223.30	147.06	-13.22	23.86	-149.70
10h-11h	-144.77	-75.87	178.06	380.13	369.45	222.51	188.69	316.00	212.48	79.03	67.12	-167.63
11h-12h	-289.69	-245.85	50.22	268.33	247.57	141.71	102.04	266.41	141.95	24.51	-76.93	-341.07
12h-13h	-426.22	-379.69	-60.03	136.68	91.43	49.08	-1.82	224.03	73.36	-38.57	-225.80	-504.04
13h-14h	-255.36	-146.51	92.73	260.79	224.55	155.00	155.43	344.29	223.52	115.42	-71.64	-324.06
14h-15h	-48.75	73.54	250.76	399.05	359.29	321.84	286.13	450.88	336.95	241.97	60.13	-104.78
15h-16h	8.39	127.80	253.86	365.15	381.80	349.90	323.24	476.28	365.61	263.09	31.41	-63.18
16h-17h	-92.07	3.25	118.65	205.82	212.35	266.84	255.72	329.28	257.47	140.07	-123.08	-168.48
17h-18h	-188.65	-150.94	-33.71	46.04	59.19	139.76	138.06	182.71	87.56	-24.51	-186.88	-215.87
18h-19h	-220.78	-235.03	-136.73	-88.50	-65.67	17.72	23.98	11.57	-65.53	-130.11	-202.08	-224.53
19h-20h	-69.82	-76.87	-38.62	-37.77	11.19	54.84	52.26	-5.09	-14.23	-42.51	-62.69	-75.94
20h-21h	-65.22	-72.48	-37.58	-60.99	-16.81	20.52	10.63	-35.71	-38.45	-40.54	-54.30	-70.21
21h-22h	-56.02	-62.93	-30.23	-58.80	-24.05	1.48	-15.69	-52.36	-30.55	-30.51	-44.81	-60.13
22h-23h	-69.95	-78.10	-44.52	-64.93	-39.90	-21.91	-40.48	-59.03	-41.92	-43.51	-58.62	-72.77
23h-24h	-73.35	-82.12	-47.96	-64.47	-43.42	-24.75	-42.61	-54.66	-43.06	-47.48	-61.33	-75.50
	-3077.75	-2589.46	36.26	1839.38	2161.19	1836.31	1447.97	2423.61	1200.81	-120.26	-1676.86	-3481.19

Nous allons donc pouvoir stocker de l'énergie en mars, avril, mai, juin, juillet, août et septembre. Et on doit stocker au maximum, la somme des excédents sur chaque mois :

soit la somme de chaque bas de colonne, multiplié par 30 ce qui donne **10945,53 MWh à stocker.**

Si on prend une batterie de Lithium-Air, d'après notre rapport précédent, la densité d'énergie massique est de 2500 Wh/kg ce qui, dans notre cas, donne **438 tonnes de batteries.**

Il reste à savoir comment obtenir une quantité aussi grande de batterie qui stocke aussi longtemps, ou comment augmenter la densité d'énergie massique pour rendre possible ce type de plan de stockage.

3.4. Méthode de calcul pour le plan de stockage sans stockage intersaisonnier

Afin d'obtenir un plan de stockage de la sorte, il faut que le champ de panneaux photovoltaïque produise suffisamment d'énergie pour subvenir aux besoins du mois de l'année où la production est la plus faible.

Il faut tout d'abord dimensionner la surface de panneaux photovoltaïque nécessaire à couvrir la demande sur le mois de février. Pour cela, nous sommes les productions horaires sur la journée type du « pire » mois, puis nous déterminons par produit en croix la surface nécessaire pour l'assurer.

Une fois ce calcul réalisé, il suffit de multiplier par la surface choisie le tableau de production photovoltaïque par m². Puis, la différence entre la production et la demande nous donne le plan de stockage

Conclusion

Cette étude touche donc à son terme. Notre livrable est au complet : nous avons d'abord réalisé un benchmark des technologies existantes pour savoir quelles technologies utiliser dans notre quartier futur à Grenoble.

Après ce benchmark, nous nous sommes lancés dans la réalisation des diagrammes/ histogrammes 3D : consommation, productions autant photovoltaïque qu'hydraulique. Mais comme nous l'avions vu, ces diagrammes ne sont pas une fin en soi. Ce ne sont que des outils, des outils pour réaliser des plans de stockage. Ces plans de stockage correspondent à la détermination de la surface de panneaux photovoltaïques à utiliser, la quantité d'eau à remonter dans le barrage ainsi que le volume de batteries à court terme qu'il va falloir installer pour régler le problème du stockage journalier ; mais aussi la quantité de stockage hypothétique saisonnier à installer un jour si un tel stockage voit le jour.

Ces valeurs correspondent à l'aboutissement de notre projet. Elles montrent que notre méthode aboutit à un résultat concret. Bien sûr, tous ces résultats sont à prendre avec prudence, car nous avons fait les approximations qui vous ont été ici exposées.

Pour finir, ce rapport montre une méthode perfectible très facilement, avec des facteurs modifiables sans problème, ce qui peut rendre cette méthode intéressante dans la suite du projet d'Energitecture.

