

---

# ESTUDIO DE UN DEMOSTRADOR DE MICRO- RED URBANA

---

Transition Energy Demonstrator with Urban System - TEDEUS



Universidad de Oviedo

GRENOBLE INP – ENSE3 – IEE (PS)

Grado en Ingeniería Eléctrica - Escuela Politécnica de Ingeniería de Gijón  
Universidad de Oviedo

## Agradecimientos

Primeramente me gustaría agradecer su ayuda y diligencia durante este proyecto a mi tutor de empresa, el señor Gérard Charot, así como por haberme formado en el ámbito de la gestión de proyectos gracias a su experiencia.

Siguientemente a Fabrice Harscoet, responsable del servicio “Investigación y Desarrollo” de Siemens en Grenoble, por haberme elegido para este proyecto y haberme acogido en su equipo. De igual manera, me gustaría reconocer mi gratitud al conjunto del equipo de I+D por su acogida y buen humor día a día.

Muchas gracias a mi tutor del ENSE<sup>3</sup>, el señor Vincent Debusschere, por sus consejos y respuestas a todas mis preguntas.

Igualmente, agradecer a mis compañeros en prácticas todos sus consejos, especialmente a Cécile Lim, por haberme ayudado con el diseño y corrección de mi informe en francés, y a Md. Shahinur Islam, por haber trabajado conmigo en calidad de compañero de equipo.

Me gustaría agradecer a la Universidad de Oviedo y, en particular a la Escuela Politécnica de Ingeniería de Gijón, la oportunidad de poder realizar un curso de mis estudios en el extranjero, adquiriendo así un mayor conocimiento y experiencia en mi materia.

Finalmente dar las gracias a mi tutor de convenio, el señor Joaquín González Norniella, por el seguimiento durante mi estancia en Francia, y al señor Manés Fernández Cabanas, por su ayuda a la hora de resolver cualquier problema con la documentación del acuerdo ERASMUS y por sus buenos consejos y buena fe a la hora de hacer lo posible y lo inhumano por que todo salga bien en la escuela.

## 1. Table des matières

<b>Agradecimientos</b> .....	<b>1</b>
<b>1. Introducción</b> .....	<b>3</b>
1.1. Misiones du projet .....	<b>¡Error! Marcador no definido.</b>
<b>2. Presentación de Siemens</b> .....	<b>4</b>
2.1. Siemens, un grupo internacional y multidisciplinario .....	4
2.2. Las actividades de Siemens .....	5
2.3. Siemens en Francia.....	5
<b>3. Presentación del proyecto</b> .....	<b>6</b>
3.1. Organización de la actividad.....	7
2.1.1. Metodología de descomposición de las actividades .....	8
2.1.2. Planificación .....	9
<b>4. Conclusión</b> .....	<b>10</b>
<b>5. Resumen de la experiencia</b> .....	<b>11</b>

## 1. Introducción

Gracias a su proyecto TEDEUS (Transition Energy Demonstrator with Urban System), Siemens desea promover el uso de tecnologías para la creación de Energía Renovable, siendo éstas eólica, fotovoltaica e hidráulica. En paralelo, se tendrán en cuenta los distintos usos del consumo de energía, como la propulsión de vehículos eléctricos o de hidrógeno y sus necesidades para ser adaptados a la red eléctrica. Igualmente, se buscarán soluciones de almacenamiento electroquímico (baterías o tanques de hidrógeno) y de reciclado de la energía que ofrezcan la posibilidad de desplazamiento o de calefacción de los edificios de alguna otra manera el día de mañana.

Siemens, con su proyecto TEDEUS, quiere hacer un demostrador a escala real, combinando esas nuevas tecnologías con el medio urbano con el propósito de estudiar sus interacciones, su aceptabilidad social y su eficiencia energética.

### 1.1. Misiones del proyecto

La primera consiste en definir el esquema eléctrico de la instalación global, los materiales que se van a instalar y sus características técnicas. El alcance del demostrador comprende el poste de alta tensión que asegura la conexión a la red eléctrica, las instalaciones de producción y almacenamiento de energía y los sistemas de calefacción y de alimentación eléctrica terciaria de la parcela de Siemens en Grenoble, que servirá para este experimento.

El objetivo de la segunda es identificar los inversores y socios pertinentes y motivados para acompañar a Siemens en este proyecto.

La tercera tiene por objetivo realizar toda la documentación del proyecto: síntesis descriptivas, presentaciones e informes de subvenciones.

## 2. Presentación de Siemens

### 2.1. Siemens, un grupo internacional y multidisciplinario

El Grupo Siemens, especialista en el campo de la alta tecnología, está presente en varios sectores. Esta empresa alemana tiene sus sedes en Berlín y Múnich. Creado por Werner von Siemens en Berlín en 1847, Siemens primero fue llamado "Telegraphen-Bauanstalt von Siemens & Halske" para, finalmente, convertirse en Siemens AG en 1966 después de muchos cambios y fusiones con demás empresas.

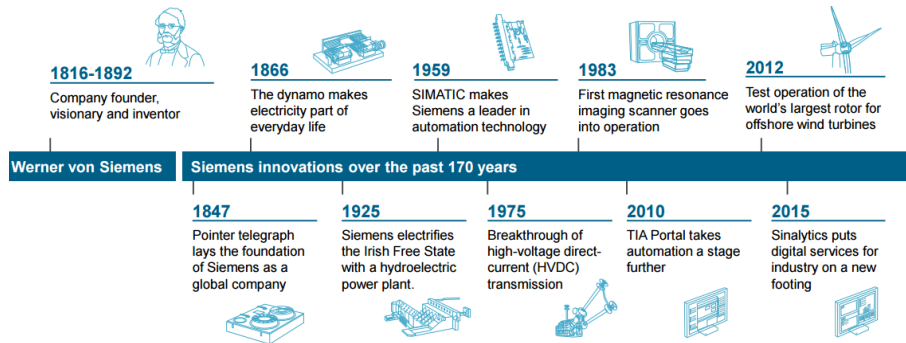
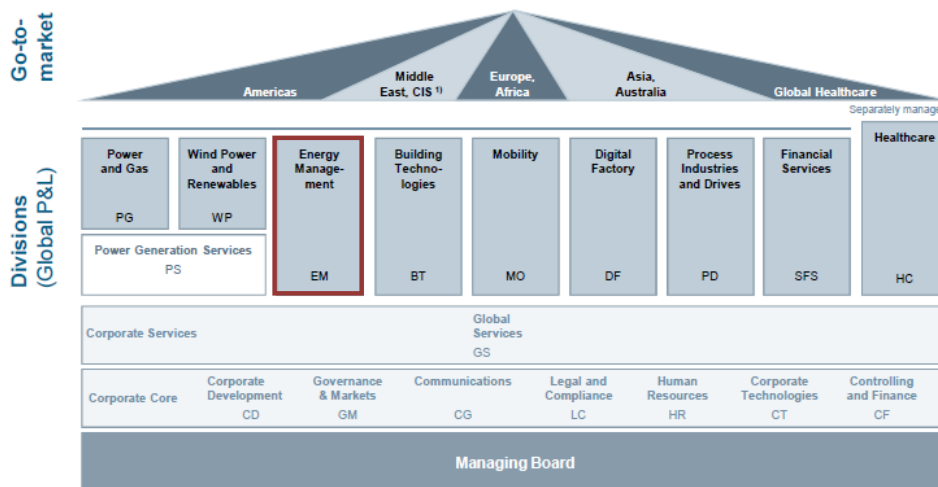


Figura 2-1: Historia de Siemens

Gracias a su constante innovación, Siemens está presente en más de 200 países y cuenta con más de 345.000 empleados. En 2015, Siemens registró un volumen de ventas de 75,6 billones de euros. Miles de productos, soluciones y servicios son evaluados bajo el nombre de Siemens y bajo diez sectores de actividad, enumerados a continuación.



1) Commonwealth of Independent States

Figura 2-2: Divisiones y sectores de actividad de Siemens

## 2.2. Las actividades de Siemens

Siemens es un grupo multidisciplinario organizado bajo diferentes divisiones según su sector de actividad (Figura 2-3) y el mercado del que se ocupen (Figura 2-4).

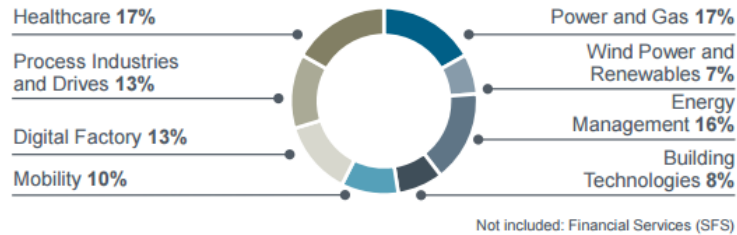


Figura 2-3: Ingresos por sector de actividad



Figura 2-4: Ingresos por mercado

## 2.3. Siemens en Francia

Desde hace alrededor de 150, Siemens está presente en Francia, siendo el primer grupo europeo dentro del campo de la alta tecnología. Con más de 8000 colaboradores, 7 plantas de producción, 9 centros de I+D y 6 centros de competencias internacionales, la empresa se reafirma en todos sus sectores de actividad.

### 3. Presentación del proyecto

El proyecto en el cual se ha trabajado durante estas prácticas se llama " Transition Energy Demonstrator with Urban System – TEDEUS " y fue encargado por el departamento de ventas (área comercial). Este departamento usa la I + D para desarrollar nuevas soluciones de producción y consumo de energía en relación al barrio y más precisamente a la parcela de Siemens.

Tres demostradores pilotos han sido diseñados con el objetivo de optimizar la energía dentro de la óptica de un barrio energéticamente ecológico. Cada uno de ellos tiene unas características diferentes, pero están diseñados de manera especial para estar conectados entre sí. Sus objetivos son:

- Demostrador 1, el superconductor urbano: Instalación de una línea de transmisión innovadora y adaptada al entorno urbano, una línea no convencional. El objetivo es reemplazar el cable subterráneo de 20 kV - 1200 A entre los postes de 220/20 kV para ayudar al aumento de la potencia transmitida. Para esta sustitución, pueden implementarse dos posibilidades: una línea con aislamiento por gas (Figura 3-1) o un cable superconductor (Figura 3-2) para poder tener aire limpio, sin SF6. Esta solución está



Figura 3-1: Línea de aislamiento por gas



Figura 3-2: Cable superconductor

diseñada para espacios pequeños y para cumplir con los requisitos de aumento de potencia en la ciudad, teniendo en cuenta las necesidades de incremento de la potencia de los laboratorios de la Presqu'île científica Grenoble (barrio científico).

- Demostrador 2, el pose de alta tensión urbano del futuro: Instalación de una subestación de alta tensión innovador, compacto, respetuoso con el medioambiente e integrado en el entorno urbano, para eliminar el impacto visual y aumentar la seguridad de los habitantes próximos a la subestación. El objetivo es reemplazar la subestación de 72/20 kV de "Cit  Jean Mace", situado al lado de la parcela de Siemens, por una subestaci3n GIS, no contaminante y libre de SF6, integrándolo en un edificio residencial. La estaci3n estará equipada con un transformador de éster no inflamable y un sistema de recuperaci3n de calor para calentar el edificio en el que está instalado.
- Demostrador 3, la micro-red urbana: Se basa en la proposici3n de soluciones de producci3n, almacenamiento, consumo local y gesti3n de energías respetuosas con el medio ambiente de un extremo al otro de la cadena energética. Esta parte del proyecto

TEDEUS propone una renovación de la parcela de Siemens en Grenoble combinando el uso de las nuevas tecnologías PEM (Proton-Exchange Membrane) y el conocimiento de los laboratorios de investigación del barrio científico de Grenoble y de Siemens para el desarrollo de los recursos energéticos renovables (siendo estos eólicos, solares e hidráulicos), de edificios de energía positiva y de instalaciones de almacenamiento de energía. Por lo tanto, la aplicación de soluciones innovadoras dará pie a la optimización del uso de la energía limpia producida, como el hidrógeno gracias a un electrolizador PEM. Esta micro-red dará la oportunidad de ser probada en condiciones reales con soluciones de control, supervisión y adquisición de datos, así como previsión, planificación y optimización en tiempo real de los flujos de energía y la protección de datos, es decir, será un centro de formación para los futuros operadores de las micro-redes.

Durante este proyecto, el demostrador en el cual he trabajado, en un equipo formado por otro alumno del ENSE<sup>3</sup>, ha sido el tercero, de ahí que este proyecto se llame *“Estudio de un demostrador de micro-red urbana”*.

Como mencionado anteriormente, una de las partes de este proyecto ha sido la gestión de la comunicación con clientes o colaboradores potenciales. Durante estas prácticas he sido yo quien se ha encargado de la mayor parte de los intercambios de información con empresas externas, con el objetivo de tomar un primer contacto y reunir información sobre sus productos. En el caso de estar interesados, el contacto se mantendría para poder definir la relación comercial entre Siemens y la otra empresa.

### 3.1. Organización de la actividad

Para este proyecto, se va a utilizar una estructura de descomposición llamada *“Work Breakdown Structure”* (WBS) según el *“Project Management Institut”*, por la cual el proyecto será organizado de una forma jerárquica en diferentes tareas llamadas *“Work Packages”*.

La WBS está formada por elementos, los cuales corresponden cada uno a una tarea o un conjunto de tareas del proyecto. El primer elemento de este sistema es el proyecto en sí, de ahí que se le llame como éste, TEDEUS. A partir de aquí, otros elementos serán creados a un nivel organizacional inferior para representar cada sub-división del proyecto, es decir, los tres demostradores distintos (cf. Figura 3-3). El objetivo es de definir de manera correcta los entregables con antelación y de categorizarlos.

LA WBS tiene el objetivo de ayudar a organizar el proyecto y de definir la planificación de referencia así como el presupuesto provisional. De igual manera, permite delegar en cuanto las misiones confiadas a cada uno de los encargados de llevar a cabo el proyecto.



### 2.1.1. Metodología de descomposición de las actividades

Como ha sido previamente explicado, las tareas han sido divididas según el objetivo que se deseaba cumplir. Por ello, como se puede ver esquematizado en la siguiente figura, tendremos diferentes “Work Packages” (WP) para cada una de las actividades del proyecto.

Esta figura demuestra la distribución del proyecto con sus diferentes sub-proyectos y los WP de la parte en la cual nos hemos interesado.

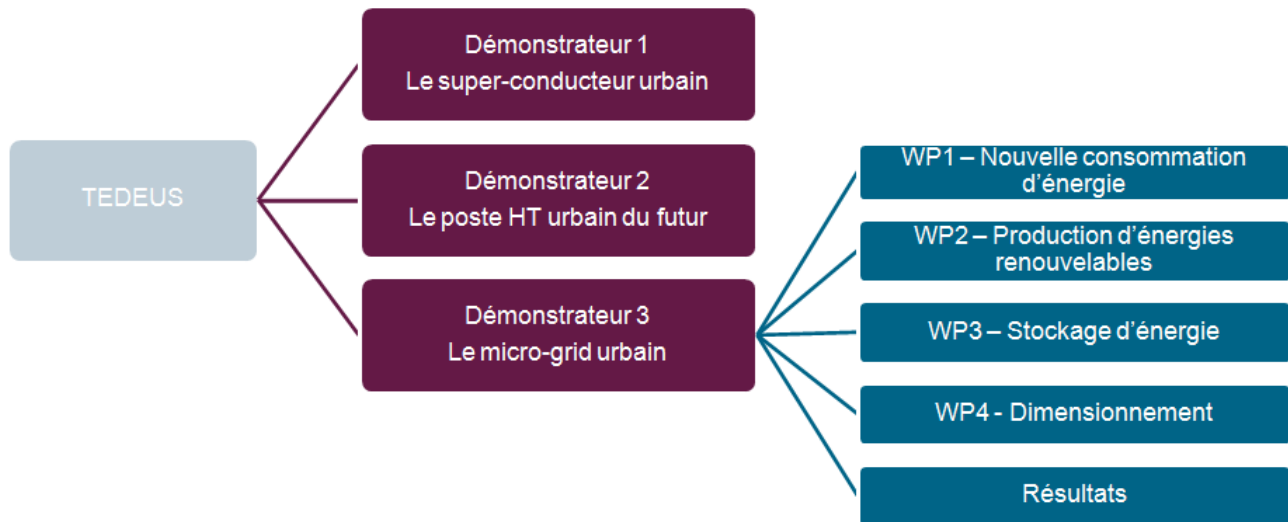


Figura 3-3: WBS del proyecto

A continuación, vamos a especificar cada uno de los WP:

- WP1 - Nuevo consumo de energía: parte dedicada al estudio del consumo de energía de la parcela de Siemens. Vamos a estudiar todo el consumo de electricidad y de gas durante un período anual y, posteriormente, con los datos debido a la remodelación del sitio, se va a estimar el consumo del futuro.
- WP2 - Producción de energía renovable: sección dedicada al estudio de los diferentes medios de producción de energía renovable, las diferentes tecnologías, sus dimensiones, su producción y consumo de energía para hacer un informe de la relación entre consumo y producción del sitio.
- WP3 - Almacenamiento de energía: parte dedicada al estudio de los diversos medios de almacenamiento de energía eléctrica o de hidrógeno. También se va a introducir el uso de tecnologías para la producción de hidrógeno, que permitirán su utilización como combustible para vehículos (por ejemplo: coches o autobuses), así como para calefacción.
- WP4 - Dimensionamiento: parte dedicada a la definición de la red de la nueva parcela Siemens, con inclusión de sistemas de control y seguimiento para garantizar el correcto funcionamiento del conjuntos de WPs anteriores.

- Resultados: parte dedicada al almacenamiento de los datos finales, es decir, la información que definirá el proyecto final.

### 2.1.2. Planificación

La Figura 3-4 muestra también la planificación estimada por Siemens en relación al proyecto TEDEUS, con sus fechas de definición, financiación y ejecución.

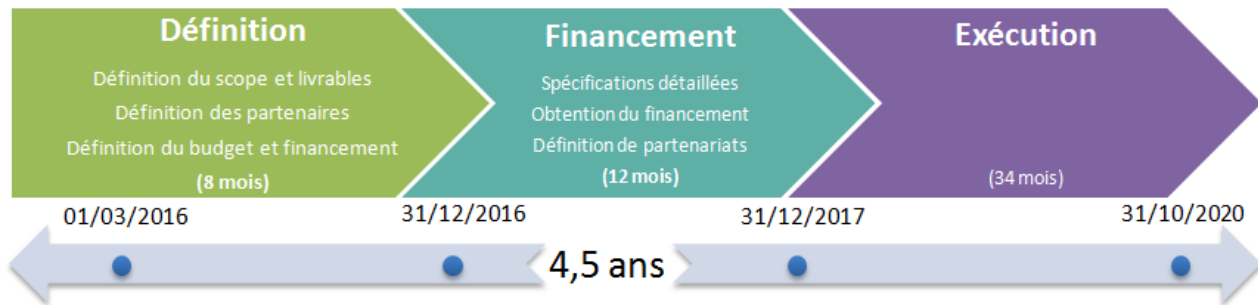


Figura 3-4: Planificación del proyecto

El conjunto de informaciones del proyecto ha sido redactado en un documento llamado “Technical study notes”, en el cual se pueden encontrar todas las informaciones referentes a la parte técnica del proyecto.

## 4. Conclusión

Las misiones de este proyecto fueron la definición del plan energético general, la identificación de posibles socios y/o clientes, dependiendo de la disposición final deseada y realizar la documentación del proyecto. Durante estos 6 meses de prácticas, hemos realizado más de un tercio de los trabajos previstos para un período de 8 meses.

Durante la vigencia de este proyecto, he podido gestionar diferentes partes del proyecto. Se han tenido que hacer varias reuniones con diversos fabricantes para recopilar información en relación con sus productos. Para lograr las estimaciones del consumo futuro y la distribución de la documentación del proyecto, he utilizado el diferentes programas Microsoft Office. Para la estimación de los datos de consumo futuro y del ROI (Return on Investment) a partir de los datos adquiridos gracias al programa Homer, he usado Excel, donde he creado tablas, curvas y hojas de resumen para diferentes escenarios. Word ha sido utilizado para el diseño de los correspondientes documentos informativos acerca de los cálculos numéricos y gráficos a partir de éstos. A continuación, PowerPoint sirvió como un resumen de la información escrita en Word. Además, el software XMind, para la creación de mapas de clientes/colaboradores en función de las tecnologías necesitadas, y Visio para la creación de diagramas SANKEY de producción/consumo de hidrógeno.

Tal como se define en la última parte, tras una comparación entre los diferentes escenarios, especificando las ventajas y limitaciones de cada uno, se decidió que la configuración más interesante para el desarrollo es la que incluye: la producción y consumo de energía renovable y la producción y consumo de hidrógeno, así como el almacenamiento de diversas fuentes de energía y la propulsión de vehículos híbridos y eléctricos para promover el uso de energías limpias. Con un ROI de aproximadamente 8 años, superior a aquellos escenarios en los cuales sólo se implementa el uso de energías renovables, y un ROI mucho menor que aquellos escenarios en los que hemos querido mostrar el uso de hidrógeno a gran escala, se establece un conjunto de tecnologías perfectamente coherente que mostrará a la sociedad el futuro de la energía.

A continuación, y como he mencionado anteriormente, todavía quedan algunos aspectos para finalizar el proyecto. La regulación ambiental es uno de los aspectos a tratar próximamente. Esta parte será tramitada por un jefe de proyectos de Siemens. Además, como se mencionó en la sección 3.1.2. *Planificación*, la duración de la implementación del proyecto en sí es alrededor de 4 años y medio.

## 5. Resumen de la experiencia

He aprendido mucho tanto a nivel profesional como personal. Profesionalmente, he aprendido a gestionar los tiempos de finalización y entrega de las diferentes partes del proyecto y a analizar rápidamente un problema expuesto.

Estas prácticas me han permitido descubrir el mundo de la gestión de proyectos en empresa y el de una oficina de diseño industrial. Pude observar el funcionamiento de un departamento de investigación y desarrollo en Siemens. Por otra parte también he podido desarrollar nuevas habilidades en técnica de gestión de una oficina de diseño, tales como la metodología a seguir para la documentación de un proyecto o las fases de un proceso de estudio.

Desde un punto de vista personal, he trabajado en un entorno industrial en el que he coincidido con muchos tipos de personalidades dentro de las diferentes funciones en una oficina, lo que me ha enseñado a manejar las distintas formas de comunicación en el lugar de trabajo. Me integré con facilidad y he sido capaz de trabajar en un proyecto interesante y revolucionario con un equipo experimentado. Estas prácticas también me ha permitido el poder aumentar la confianza en mí, gracias a la motivación de mi tutor, del cual he aprendido mucho de su experiencia.

Durante las prácticas, yo era capaz de utilizar los conocimientos adquiridos durante mi formación constantemente para simplificar los errores de cálculo y para mantener los resultados más precisos, mientras se adapta a la capacidad de cálculo disponible.



## ANNEE 2015 -2016

STAGE DE :

- 1A Découverte de l'Entreprise
- 2A Assistant Ingénieur
- 3A Projet de Fin d'Etudes**

TITRE :

**Etude d'un démonstrateur de micro-grid urbain**

Projet : Transition Energy Demonstrator with Urban System - TEDEUS

Nom et prénom de l'étudiant : **DOMINGUEZ CHANS Juan – ERASMUS**

Série 1<sup>ère</sup> année : **Formation en Espagne**

Filière 2<sup>ème</sup> année :  ASI  HOE  GEN  IEE  ME  SEM  ADMIS/T

**ETUDIANTS A L'ETRANGER**  AUTRES

**SUJET : Etude d'un démonstrateur échelle 1 de micro-grid urbain, afin de représenter de manière fiable le mélange des énergies des réseaux du futur.**

Nom de l'entreprise : **SIEMENS SAS**

Adresse : **2 rue de la Néva – BP 178 28004 GRENOBLE - France**

Nom et prénom du Maître de Stage (dans l'entreprise) : **CHAROT Gérard**

Sujet confidentiel : **Non**

## Remerciements

Je souhaite tout particulièrement remercier mon tuteur industriel Gérard Charot pour son aide et son encadrement durant ce projet de fin d'études ainsi que de m'avoir accompagné lors du stage, en m'apprenant beaucoup grâce à son expérience.

Je remercie ensuite Fabrice Harscoet, responsable du service Recherche et Développement de Siemens à Grenoble, pour m'avoir choisi pour ce projet et de m'avoir accueilli dans l'équipe. Je souhaite également exprimer ma reconnaissance à l'ensemble de l'équipe R&D pour leur accueil et leur bonne humeur au quotidien.

Un grand merci à mon tuteur école Vincent Debusschere pour ses retours sur les fiches de suivi, ses conseils et réponses à toutes mes questions.

Enfin, je remercie de même les stagiaires et alternants pour leurs conseils, particulièrement Cécile Lim, pour m'avoir aidé avec la mise en forme et la traduction de mon rapport, et Md. Shahinur Islam, pour avoir travaillé avec moi autant que binôme dans ce projet.

## 6. Table des matières

<b>Remerciements</b> .....	<b>1</b>
<b>Résumé</b> .....	<b>5</b>
<b>Abstract</b> .....	<b>6</b>
<b>1. Introduction</b> .....	<b>7</b>
1.1. Missions du projet.....	7
<b>2. Présentation de Siemens</b> .....	<b>8</b>
2.1. Siemens, un groupe international et multidisciplinaire .....	8
2.2. Les activités de Siemens .....	9
2.3. Siemens en France.....	9
2.4. Siemens à Grenoble.....	9
<b>3. Présentation du sujet du stage</b> .....	<b>11</b>
3.1. Organisation de l'activité.....	12
3.1.1. Méthodologie de décomposition des activités .....	12
3.1.2. Planification.....	14
<b>4. Notes des études techniques</b> .....	<b>15</b>
4.1. WP1 – Nouvelle consommation d'énergie .....	16
4.1.1. Approximation .....	17
4.1.2. Estimation .....	18
4.2. WP2 – Production d'énergies renouvelables .....	21
4.2.1. Energie photovoltaïque.....	22
4.2.2. Energie hydraulique .....	24
4.2.3. Energie éolienne .....	26
4.2.4. Rapport consommation-production .....	26
4.3. WP3 – Stockage d'énergie .....	26
4.3.1. SILYZER .....	27
4.3.2. SIESTORAGE .....	30
4.4. WP4 – Dimensionnement.....	31
4.4. Résultats .....	34

<b>5. Conclusion .....</b>	<b>35</b>
<b>6. Retour d'expérience .....</b>	<b>36</b>
<b>Annexe 1 : Carte des principaux transformateurs et sa puissance en 2017. ....</b>	<b>38</b>
<b>Annexe 2 : Carte des connexions des transformateurs avant la mise à neuf du site.....</b>	<b>39</b>
<b>Annexe 3 : Comparaison des différentes technologies photovoltaïques .....</b>	<b>40</b>
<b>Annexe 4 : Estimation de l'énergie solaire produite .....</b>	<b>41</b>
<b>Annexe 5 : Estimation de l'énergie hydraulique produite .....</b>	<b>42</b>
<b>Annexe 6 : Estimation de l'énergie éolienne produite .....</b>	<b>43</b>
<b>Annexe 7 : Résumé des scénarios.....</b>	<b>44</b>
<b>Annexe 8 : Réservoir, CO<sub>2</sub> et ROI .....</b>	<b>45</b>



## Table des illustrations

Figure 2-1 : Histoire de Siemens.....	8
Figure 2-2 : Divisions et secteurs d'activités de Siemens .....	8
Figure 2-3: Revenus par secteur d'activité .....	9
Figure 2-4 : Revenus par marché.....	9
Figure 2-5 : Poste conventionnel.....	10
Figure 2-6 : Poste blindé.....	10
Figure 3-1 : Ligne à Isolation Gazeuse .....	11
Figure 3-2 : Câble supraconducteur .....	11
Figure 3-3 : WBS du projet .....	13
Figure 3-4 : Planification pour l'exécution du projet.....	14
Figure 4-1 : Graphique des consommations d'électricité et gaz pendant 2015 .....	16
Figure 4-2 : Comparaison entre la consommation en 2015 et l'approximation pour 2017 .....	18
Figure 4-3 : Comparaison entre la consommation en 2015 et l'estimation pour 2017.....	21
Figure 4-4 : Cartes de la distribution du démonstrateur dans le site .....	22
Figure 4-5 : Comparaison entre les différents types de panneaux PV .....	23
Figure 4-6 : Production d'énergie avec panneaux sur les toits.....	24
Figure 4-7 : Production d'énergie avec panneaux sur le parking .....	24
Figure 4-8 : Vitesse d'écoulement du fleuve Isère .....	25
Figure 4-9 : Estimation de la production hydraulique .....	25
Figure 4-10 : Rapport consommation-production.....	26
Figure 4-11 : Meilleure correspondance aux exigences de la demande .....	30
Figure 4-12 : Compensation de la variabilité des EnR pour assurer la conformité .....	30
Figure 4-13 : Optimisation de la performance d'un générateur diesel .....	31
Figure 4-14 : Amélioration de la gestion du pic de la charge et du coût d'efficacité grâce à l'équilibre de la fourniture et de la demande d'énergie .....	31
Figure 4-15 : Carte des partenaires/fournisseurs pour le scénario 31 .....	34

## Résumé

La production d'énergie était autrefois une simple question d'avoir des centrales électriques produisant de l'électricité, consommée par les maisons et l'industrie. Les chambres étaient chauffées par des systèmes de chauffage au gaz ou à l'huile et refroidies à l'aide de climatiseurs. Les fournisseurs d'énergie compensaient les fluctuations de la demande en démarrant des centrales alimentées au gaz ou à l'aide de centrales électriques à accumulation par pompage. En conséquence, il y avait peu de fluctuations indésirables à cause de la production d'électricité.

Mais la production d'énergie est devenue s'est compliquée dès l'apparition des multiples énergies renouvelables sur le réseau. La situation est de plus en plus complexe depuis que les consommateurs peuvent aussi produire de l'énergie, soit produite à partir de panneaux photovoltaïques montés sur les toits ou avec des éoliennes. Ainsi, ils deviennent «prosommateurs», c'est-à-dire, qu'ils sont à la fois producteurs et consommateurs.

Suite à ces développements, les réseaux intelligents deviennent de plus en plus indispensables pour assurer la transmission et la distribution d'énergie électrique à partir d'un nombre croissant de sources fluctuantes. Les réseaux intelligents contribuent à accroître l'efficacité énergétique en intégrant les "prosommateurs" et en équilibrant l'offre et la demande. Aujourd'hui, plus de 100 projets de réseaux intelligents sont déjà mis en place en Europe, puisqu'ils sont particulièrement importants pour le management durable de l'énergie dans les zones urbaines. Cependant, la plupart d'entre eux sont basés sur une seule source d'énergie et se réfèrent uniquement au monitoring et à la demande-réponse liée à la production d'énergies renouvelables.

Le projet TEDEUS se concentrera, dans un environnement urbain très dense, sur la combinaison d'une multitude de systèmes innovants différents qui formeront un ensemble cohérent, de génération de puissance versatile au stockage d'énergie et permettra le développement de nouveaux usages de consommation.

**Mots clefs:** Réseau intelligent, producteur, consommateur, équilibrer, stockage.

## Abstract

Energy generation once was a simple matter of having power stations produce electricity that was consumed by households and industry. Rooms were kept warm with gas or oil heating systems and cold with air conditioners. Energy suppliers offset fluctuations in demand by starting up gas-fired power plants or using pumped-storage electrical power stations. As a result, there weren't really any unwanted fluctuations in electricity production.

But power generation has become more complicated since renewable sources of energy started multiplying on the grid. Complexity has all the more increased as now more and more consumers also produce energy, being it from roof-mounted solar panels or wind turbines, turning them into "prosumers", meaning this, being producers and consumers at the same time.

As a result of these developments, smart grids are becoming necessary to safeguard the transmission and distribution of electricity from a growing number of fluctuating sources. Smart grids help to increase energy efficiency by incorporating "prosumers" and balancing supply and demand. Today, more than 100 smart grid projects are already implemented in Europe, seen that they are particularly important for the sustainable management of energy in urban areas. However, most of them are based on a single energy source and address to solely monitoring and to demand-response linked to renewable energy production.

TEDEUS will focus, in a highly dense urban environment, on combining a host of different innovative systems which will form a coherent whole, from versatile power generation to energy storage and new consumption usage development.

**Keywords:** Smart grid, producer, consumer, balance, storage.

## 1. Introduction

Grâce à son projet TEDEUS (Transition Energy Demonstrator with Urban Systems), Siemens souhaite promouvoir l'intégration de nouvelles technologies pour la création d'Énergies Renouvelables (EnR), qu'elles soient éoliennes, panneaux photovoltaïques ou turbines hydrauliques. En parallèle, la prise en compte des nouveaux usages de consommation, telles que les véhicules électriques ou à hydrogène nécessitent l'adaptation des réseaux électriques. Des solutions de stockage électrochimique (ex. : batteries li-ion) et de stockage d'hydrogène seront mises en place pour assurer deux cas : celui de l'électricité pour la continuité de la fourniture et celui de l'hydrogène pour la propulsion de voitures hybrides.

Dans le cadre du projet TEDEUS, nous souhaitons réaliser un démonstrateur à l'échelle 1, combinant ces nouvelles technologies en milieu urbain afin d'étudier leurs interactions, leurs acceptabilités sociétales et leurs efficacités énergétiques.

### 1.1. Missions du projet

La première mission consiste à définir le schéma énergétique de l'installation globale, les matériels à installer et leurs caractéristiques techniques. Le scope du démonstrateur comprend le poste haute tension assurant le raccordement au réseau électrique existant, les installations de production et de stockage d'énergie et les systèmes de chauffage, ainsi que d'alimentation électrique tertiaire du site Siemens de Grenoble qui servira de cadre à cette expérimentation.

La deuxième mission a pour but d'identifier les partenaires pertinents et motivés pour accompagner Siemens sur ce projet.

La troisième mission a pour objectif de réaliser la documentation du projet : descriptifs synthétiques, présentations et dossiers de subvention.

## 2. Présentation de Siemens

### 2.1. Siemens, un groupe international et multidisciplinaire

Le groupe Siemens, spécialisé dans les domaines de la haute technologie, est présent dans plusieurs secteurs d'activités. Cette entreprise allemande a ses sièges sociaux à Berlin et Munich. Créé par Werner von Siemens à Berlin en 1847, Siemens était premièrement nommé « *Telegraphen-Bauanstalt von Siemens & Halske* », pour être finalement Siemens AG à partir de 1966 après nombreux changements et fusions avec d'autres entreprises.

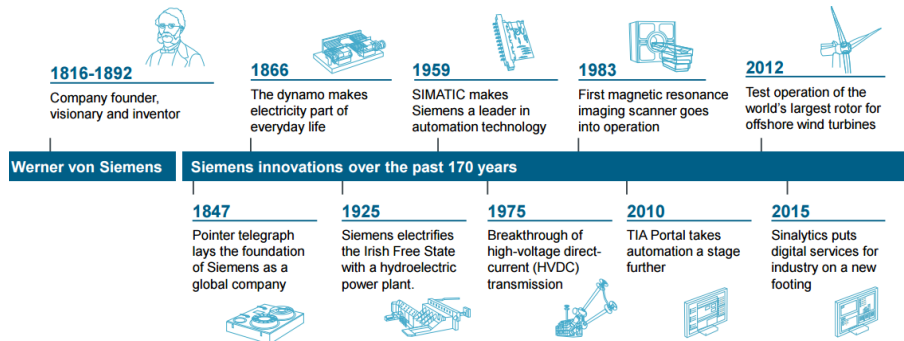
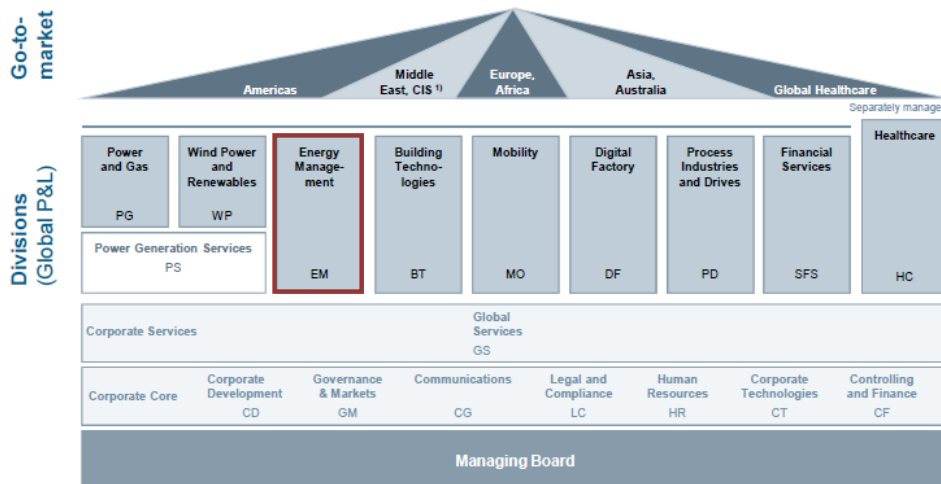


Figure 2-1 : Histoire de Siemens

Grâce à sa constante innovation, Siemens est aujourd'hui présent dans plus de 200 pays et compte plus de 345 000 employés. En 2015, Siemens a enregistré un chiffre d'affaire de 75.6 milliards d'euros. Plusieurs milliers de produits, solutions et services sont expertisés sous le nom Siemens et sur dix secteurs d'activité présentés ci-dessous.



1) Commonwealth of Independent States

Figure 2-2 : Divisions et secteurs d'activités de Siemens

## 2.2. Les activités de Siemens

Siemens est un groupe multidisciplinaire organisé sous plusieurs divisions selon le secteur d'activité (Figure 2-3) et le marché dont ils occupent (Figure 2-4) :

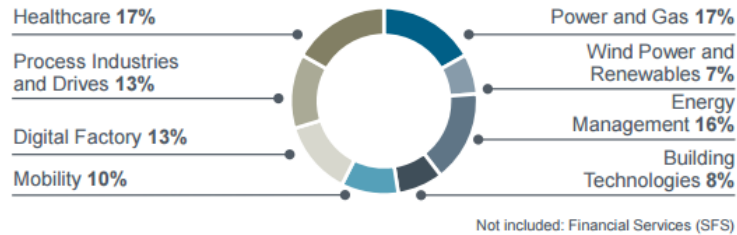


Figure 2-3: Revenus par secteur d'activité



Figure 2-4 : Revenus par marché

## 2.3. Siemens en France

Présent en France depuis environ 150 ans, Siemens est le premier groupe européen dans le domaine de l'haute technologie. Avec ses 8 000 collaborateurs, 7 sites de production, 9 centres de R&D et 6 centres de compétences mondiaux, l'entreprise s'affirme sur tous ses secteurs d'activités.

## 2.4. Siemens à Grenoble

Le site de Siemens à Grenoble appartient au secteur *Energy Management*. Ce secteur est l'un des principaux fournisseurs mondiaux de produits, solutions et services pour le transport ainsi que la distribution d'énergie électrique. Elle propose un vaste portefeuille de systèmes pour les réseaux à haute et basse tension ainsi que des solutions pour les réseaux intelligents et d'automatisation de l'énergie pour des sites industriels.

A Grenoble, Siemens est spécialisé dans les systèmes de transmission et distribution haute tension allant de 72,5 kV jusqu'à 420 kV. Deux types de postes haute tension peuvent être distingués par leur moyen d'isolation :

- Air Insulated Switchgear (AIS) (cf. Figure 2-5) est le matériel conventionnel dans lequel l'air atmosphérique est utilisé pour isoler les phases les unes des autres ;

- Gas Insulated Switchgear (GIS) (cf. Figure 2-6) est un appareil blindé. Il est muni d'une enveloppe métallique dans lequel le gaz SF<sub>6</sub> (hexafluorure de soufre) est utilisé pour ses capacités d'isolation et de coupure de l'arc électrique.

Par ailleurs, le site est divisé en plusieurs activités :

- « Transmission Solution » : projets clients clef en main (ex : postes électriques, fermes solaires).
- « Customer service » : service après vente et maintenance des produits proposés actuellement et vintage (qui ne sont plus commercialisés) ;
- « Recherche et développement » : développement de nouveaux produits haute tension. Ce service se concentre plus particulièrement sur le développement de postes GIS (cf. Figure 2-6).



Figure 2-5 : Poste conventionnel



Figure 2-6 : Poste blindé

Le stage s'est effectué au sein du service R&D de Siemens à Grenoble. Ce service est structuré par différents groupes :

- Bureau d'études : Il se compose de deux équipes.
  - Conception mécanique et développement de projet : conception des composants des postes blindés. Les dessinateurs utilisent le logiciel de modélisation Pro/Engineer afin de représenter sous modèles 3D des disjoncteurs, des sectionneurs et d'autres composants d'un poste électrique. Des équipes pour les projets sont constituées par un chef de projet, des ingénieurs études et des concepteurs ;
  - Calculs et simulation : simulation numérique des différents phénomènes qui sont possibles d'intervenir dans un poste blindé. Les simulations peuvent être des études mécaniques, électriques ou thermiques ;
- Pôle industriel : Approvisionnements à partir des plans fournis par le bureau d'étude et montage des prototypes dans un atelier mis à disposition pour la R&D ;
- Laboratoire d'essai : des chargés d'essai effectuent des tests de développement sur les prototypes.

Mon stage s'est réalisé dans le groupe Bureau d'Etudes.



### 3. Présentation du sujet du stage

Le projet dans lequel s'inscrit ce stage est appelé « Transition Energy Demonstrator with Urban System – TEDEUS » et a été commandé par le département de ventes (division commerciale). Ce service a fait appel à la R&D afin de développer de nouvelles solutions de production et de consommation d'énergie par rapport au quartier et plus précisément au site.

Trois démonstrateurs pilotes ont été pensés avec le but d'optimiser l'énergie dans le cadre d'un éco-quartier. Ils ont chacun des caractéristiques différentes, mais sont conçus pour être en lien les uns avec les autres. Leurs objectifs sont les suivants :

- Démonstrateur 1, le super-conducteur urbain : L'installation d'une ligne de transport innovante et adaptée au milieu urbain, une ligne non conventionnelle. Le but est de remplacer le câble souterrain de 20 kV – 1200 A entre le poste AIS 220/20 kV pour permettre d'accroître la puissance transitée. Pour ce remplacement, deux possibilités peuvent être mises en place : une **ligne à isolation gazeuse (LIG) (Figure 3-1)** ou un **câble supraconducteur (Figure 3-2)** pour avoir de l'air propre, sans SF6. Cette solution a été conçue pour les espaces restreints et pour répondre aux besoins d'augmentation de puissance en ville, en tenant compte des besoins de puissance accrue des grands laboratoires de la Presqu'île scientifique grenobloise.



Figure 3-1 : Ligne à Isolation Gazeuse



Figure 3-2 : Câble supraconducteur

- Démonstrateur 2, le poste HT urbain du futur : L'installation d'un poste haute tension innovant, compact, respectueux de l'environnement et intégré au milieu urbain, pour effacer l'impact visuel et renforcer la sécurité des citoyens qui habitent à côté. Le but est de remplacer le poste AIS 72/20 kV de « Cité Jean Macé », se situant à côté du site de Siemens, par un poste GIS, propre et sans SF6, intégré dans un immeuble résidentiel. Le poste sera équipé d'un transformateur ester non inflammable et d'un système de récupération de chaleur, permettant de chauffer l'immeuble dans lequel il est installé.
- Démonstrateur 3, le micro-grid urbain : La proposition des solutions de production, stockage, consommation locale et gestion d'énergies respectueuses de l'environnement d'un bout à l'autre de la chaîne énergétique. Cette partie du projet TEDEUS propose une rénovation du site Siemens de Grenoble combinant le savoir faire



des PEM (Proton-Exchange Membrane) innovantes, des laboratoires de recherche du bassin Grenoblois et de Siemens pour la mise en place des ressources d'énergies renouvelables (qu'elles soient éoliennes, solaires et hydrauliques), des bâtiments à énergie positive et des moyens de stockage. Ainsi, la mise en œuvre de solutions innovantes optimisera l'utilisation des énergies propres produites, comme l'hydrogène grâce à un électrolyseur PEM. Ce micro-grid donnera la possibilité d'être testé en conditions réelles avec des solutions de contrôle, de supervision et d'acquisition de données au même titre que la prévision, planification et optimisation en temps réel des flux d'énergie ainsi que la protection des données, c'est-à-dire, un centre d'entraînement pour les futurs opérateurs des micro-grids.

Pour ce stage, le démonstrateur pour lequel j'ai travaillé, en binôme avec un autre élève de l'ENSE<sup>3</sup>, a été le troisième démonstrateur, le micro-grid urbain.

Comme mentionné précédemment, une des parties du stage est la communication avec les clients ou partenaires potentiels. Tout au long du stage j'ai assuré la majorité des échanges avec les entreprises externes à Siemens dans le but de collecter des informations sur ses produits et prendre le premier contact. Dans le cas pour lequel nous étions intéressés, nous gardons contact pour définir la relation commerciale avec eux.

### 3.1. Organisation de l'activité

Dans le cadre de ce projet, nous allons utiliser une structure de découpage appelée « Work Breakdown Structure » (WBS) selon le « Project Management Institut », pour laquelle le projet sera décomposé hiérarchiquement en différentes tâches appelées « Work Packages ».

La WBS est constituée d'éléments, qui correspondent chacun à une tâche ou à un ensemble de tâches du projet. Le premier élément d'une WBS est le projet lui-même, qui recevra le nom du projet, TEDEUS. À partir de celui-ci, d'autres éléments sont créés à un niveau inférieur pour représenter chaque élément du projet, on parle alors des démonstrateurs (cf. Figure 3-3). L'objectif est de bien déterminer les livrables au préalable et de les catégoriser.

La WBS a pour but d'aider à organiser le projet, à établir la planification de référence ainsi que le budget prévisionnel. Il permet également de déléguer et de contractualiser la mission confiée à chaque acteur.

#### 3.1.1. Méthodologie de décomposition des activités

Comme expliqué précédemment, les tâches ont été divisées selon l'objectif à accomplir. Pour cela, nous aurons, comme schématisé dans la Figure 3-3, différents « Work Packages » (WP) pour chacune des activités du projet.

La Figure 3-3 montre la distribution du projet avec les différents sous-projets et les WP de la partie sur laquelle nous allons nous intéresser, ainsi que l'estimation du budget d'implantation industrielle nécessaire pour son exécution.

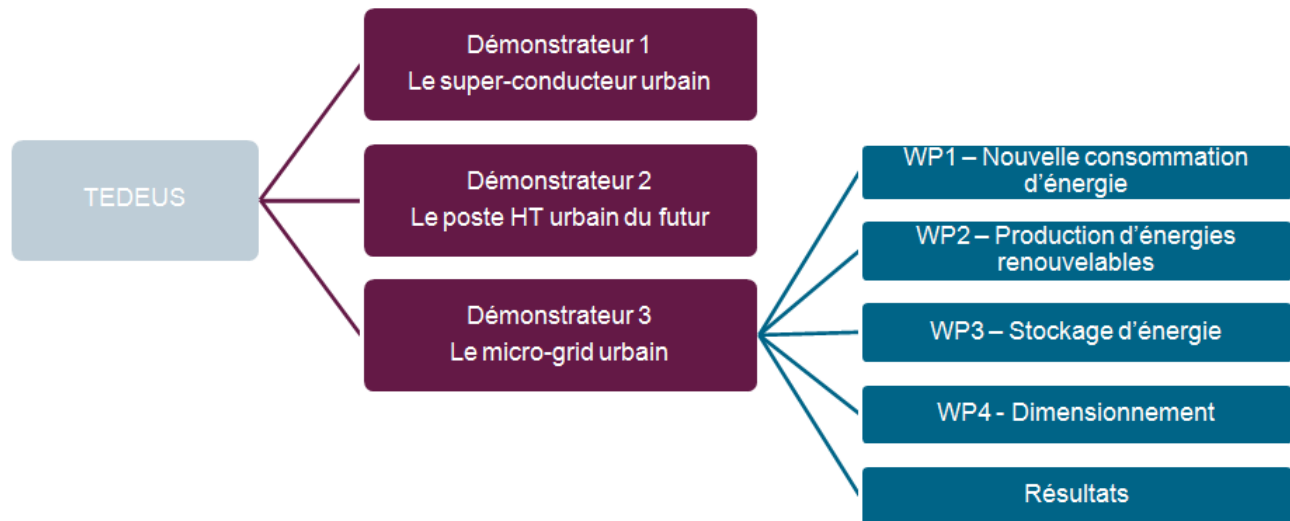


Figure 3-3 : WBS du projet

Par la suite, nous précisons chaque WP :

- WP1 – Nouvelle Consommation d'Énergie : partie dédiée à l'étude de la consommation énergétique du site. Nous allons étudier l'ensemble des consommations d'électricité et gaz pendant une période annuelle et puis, avec les données dues à la remise à neuf du site, je vais estimer la consommation du futur.
- WP2 – Production d'Énergies Renouvelables : partie dédiée à l'étude des différents moyens de production d'énergies renouvelables, les dimensions des technologies, leurs productions et leurs consommations d'énergie pour faire un rapport consommation/production du site.
- WP3 – Stockage d'Énergie : partie dédiée à l'étude des différents moyens de stockage d'énergie, soit électrique ou de l'hydrogène. Nous allons aussi vous présenter des technologies pour produire de l'hydrogène afin d'avoir la possibilité de l'utiliser pour propulser des véhicules (ex. : voitures ou bus), ainsi que pour le chauffage.
- WP4 – Dimensionnement : partie dédiée à la définition du réseau du nouveau site Siemens, avec une inclusion de contrôle et monitoring pour assurer le bon fonctionnement des WP précédents.
- Résultats : partie dédiée au stockage des données finales, c'est-à-dire, les informations qui vont définir le projet final.

### 3.1.2. Planification

La Figure 3-4 montre aussi la planification estimée par Siemens par rapport au projet TEDEUS avec ses dates de définition, financement et exécution.

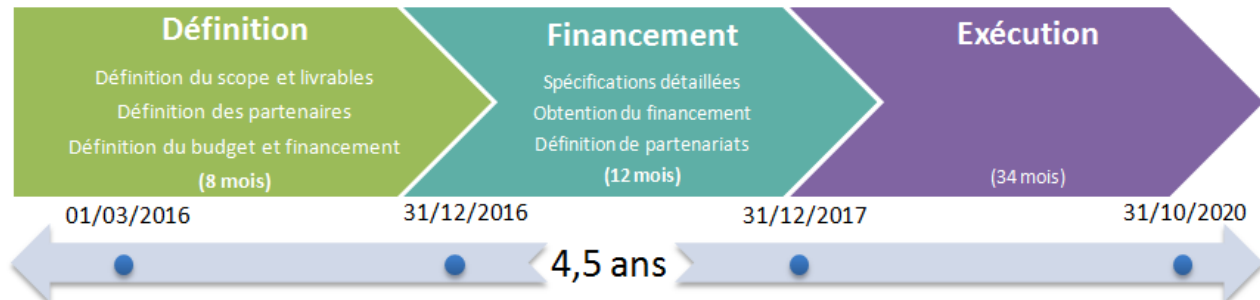


Figure 3-4 : Planification pour l'exécution du projet

L'ensemble des informations du projet sont retranscrites dans un document appelé « Technical study notes », ceci afin de retrouver la totalité des informations techniques. Dans la section 4. *Notes d'étude techniques* nous pouvons voir le résumé de ces informations.

## 4. Notes des études techniques

Tout d'abord, voici le plan du site Siemens. En ce qui concerne le plan de site actuel, nous avons 10 bâtiments différents :

- B1 - BUREAUX
- B3 - ATELIER
- B5 - TRANSFORMATEUR 20 / 5kV
- C3 - BUREAUX
- C4 - BUREAUX
- C5 - SYSTEME DE CHAUFFAGE
- C6-2 - ATELIER
- C6-1 - CANTINE
- C7 - ATELIER
- C9 - SALLES DE REUNION ET ATELIER

A l'avenir, les bâtiments B1, B3, B5 et C5 n'appartiendront plus au site Siemens, puisque les bâtiments B seront vendus et le C5, bâtiment où le système de chauffage au gaz est installé, n'aura plus d'utilité car la consommation de gaz sera nulle avec la mise à neuf du site.

Ainsi, les bâtiments restants après la remise à neuf seront :

- C3
- C4
- C6-1
- C6-2
- C7
- C9

Outre les différentes utilisations auxquelles les bâtiments ont été conçus, nous avons pensé à la possibilité de mettre en œuvre les technologies renouvelables sur le site. A cet effet, nous voudrions recouvrir les toits des bâtiments C3, C4, C6-2, C7 et C9 avec des panneaux photovoltaïques, ainsi que les aires de stationnement, où une partie du parking solaire sera recouverte par des plateformes avec panneaux photovoltaïques.

Dans les Annexes, nous allons mettre en évidence le plan du site à partir de différents points de vue car comme cela sera plus évident pour l'étudier :

- Carte des principaux transformateurs et sa puissance sans les bâtiments B1 et B5 (cf. Annexe 1).
- Carte des connexions des transformateurs avant la mise à neuf du site (cf. Annexe 2).

#### 4.1. WP1 – Nouvelle consommation d'énergie

Comme précisé dans la présentation du projet, cette partie du troisième démonstrateur a pour but d'étudier les données de consommation d'énergie sur le site, soit électrique ou du gaz, et d'estimer la consommation future.

Ces données ont été demandées à GEG (Gaz Electricité de Grenoble – fournisseur de l'électricité du site), pour la consommation d'énergie électrique, et à Cofely (fournisseur du gaz du site), pour celle du gaz. Dans le cas de GEG, l'entreprise nous a donné accès au logiciel DEMO, duquel on a acquis les données de consommation électrique toutes les 10 minutes sur l'année 2015, ainsi que les factures mensuelles. Cofely nous a aussi envoyé les factures mensuelles de 2015. Finalement, et avec toutes ces données, j'ai créé une courbe des consommations en 2015 (cf. Figure 4-1) pour pouvoir plus tard faire une comparaison avec l'estimation de la consommation à partir de la mise à neuf. Désormais, je vais me référer à la mise à neuf comme « 2017 ».

Sur le site, une pompe à chaleur tertiaire de 300 kW pour le refroidissement et le chauffage des bâtiments C3 et C4 est déjà installée, ainsi qu'une chaudière électrique tertiaire pour combattre les températures inférieures à -10°C de 252 kW. A partir de 2017, une deuxième pompe à chaleur de 650 kW sera installée pour le refroidissement et le chauffage des bâtiments C6, C7 et C9.

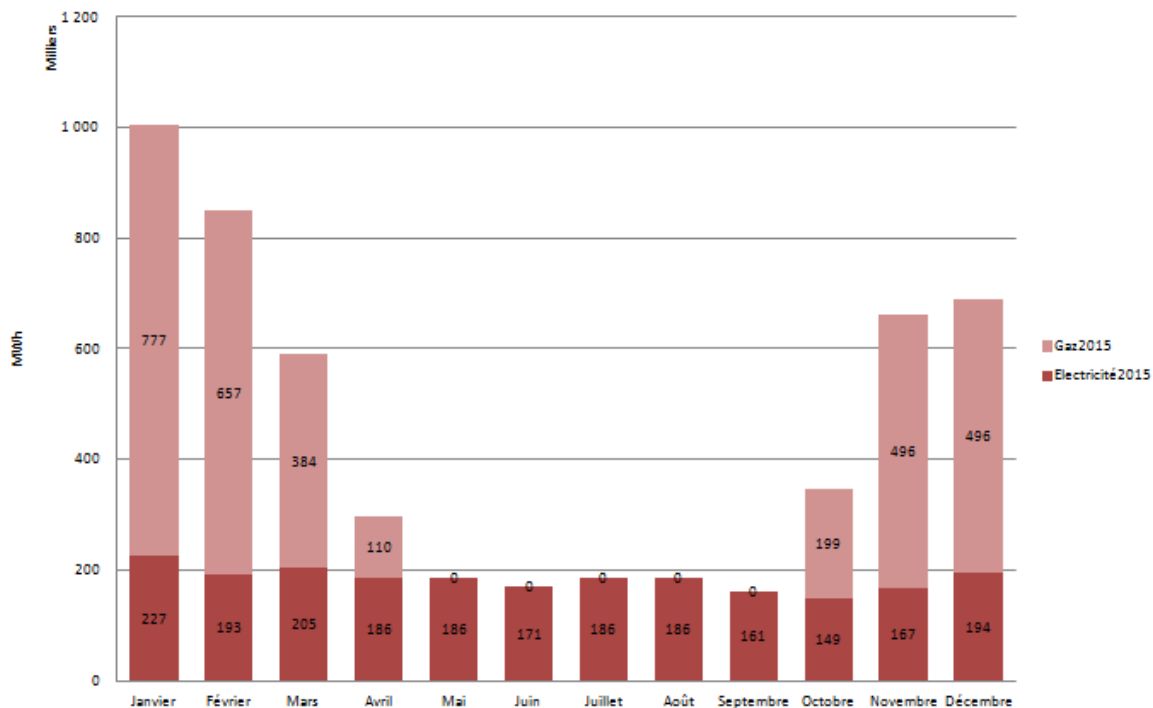


Figure 4-1 : Graphique des consommations d'électricité et gaz pendant 2015

Grâce à ces données, nous allons faire une estimation basée sur les consommations du premier trimestre de 2016 et une estimation du mois d'avril. D'abord, je vais définir les termes : pour les valeurs montrées dans le Tableau 4-1, je vais parler d'approximation, puisque ce ne sont pas les valeurs finales de la consommation possible en 2017, et pour les valeurs du Tableau 4-2, je vais

parler d'estimations parce que ce sont les valeurs finales et corrigées en tenant compte de la mise à neuf.

#### 4.1.1. Approximation

Ces valeurs m'ont permis de faire l'approximation de la consommation en 2017 en comparant les données à partir de 2015 et le premier trimestre de 2016. En analysant les consommations en 2015, nous avons approximé le résultat futur basé sur un facteur de correction (pourcentage de différence) sur les variations observées entre Janvier et Mars de 2015 et 2016 et une estimation de la consommation en Avril de 2016 sur la base des consommations précédentes et celles en cours. A partir de ces différences, j'ai réussi à approximer la consommation électrique en 2017 en multipliant la consommation en 2015 par le pourcentage de différence entre les deux années (cf. Tableau 4-2). On obtient une moyenne de 2%.

En tenant compte du fait que le restaurant d'entreprise, qui appartenait au site de Schneider et que depuis le dernier trimestre de 2015, appartient au site Siemens, a toujours été raccordée au réseau de Siemens, nous nous rendons compte que ceci est la raison pour laquelle la consommation d'électricité ne varie pas lorsque nous comparons le premier trimestre de 2016 avec le dernier trimestre 2015. En outre, nous avons appris que le restaurant d'entreprise ne consomme pas de gaz.

Dans le tableau suivant, nous pouvons voir les résultats :

Consommation Electrique	2016 (kWh)	2015 (kWh)	Approximation 2017 (kWh)
Janvier	224 333	227 431	232 036
Février	197 350	193 352	197 267
Mars	198 314	205 055	209 207
Avril	183 431 (estimation)	186 002	189 768
Mai		185 979	189 745
Juin		171 222	174 689
Juillet		186 321	190 094
Août		186 307	190 080
Septembre		161 084	164 346
Octobre		148 630	151 640
Novembre		167 321	170 709
Décembre		193 670	197 592

Tableau 4-1 : Approximations pour 2017

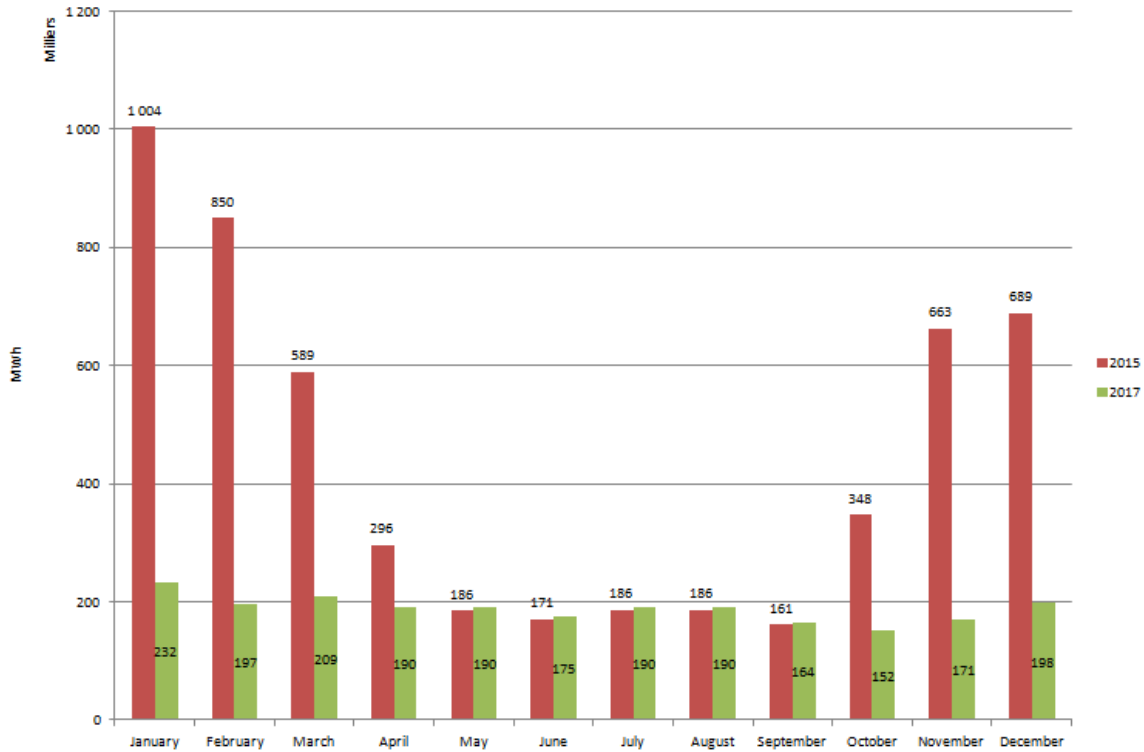


Figure 4-2 : Comparaison entre la consommation en 2015 et l'approximation pour 2017

Dans la Figure 4-2, nous pouvons voir une comparaison entre la consommation (électricité et gaz) en 2015 contre la consommation (juste électricité) en 2017 sans tenir compte de l'augmentation que sera produite par la mise en place de la nouvelle pompe à chaleur.

Consommation Electrique	Différence 2015-2016 (kWh)	% de Différence
Janvier	3 098	1,4 %
Février	3 998	2,1 %
Mars	6 741	3,3 %
Avril	2 571	1,4 %
<b>Moyenne du % de différence</b>		<b>2 %</b>

Tableau 4-2 : Comparaison entre 2015 et l'approximation de 2017

#### 4.1.2. Estimation

Avec les approximations faites précédemment et les informations sur la mise à neuf du site Siemens (suppression de l'ancien système de chauffage par gaz et inclusion d'une nouvelle pompe à chaleur), nous avons réalisé une comparaison sur la consommation actuelle par rapport aux heures de travail et nous avons obtenu la consommation possible en 2017 avec un minimum et un maximum basés sur les approximations effectuées auparavant. Nous avons seulement pris en compte le pire des cas, ce qui signifie que nous allons travailler avec les valeurs les plus grandes de la consommation future, bien que dans les calculs gérés avec Excel les deux estimations aient été étudiées.

A partir de ces informations, j'ai pu estimer la consommation en 2017 avec une formule qui va tenir en compte l'approximation de la consommation en 2015, la mise à neuf du site et la mise en place d'une nouvelle pompe à chaleur.

Suite à ces changements, nous allons calculer l'estimation pour 2017 basé sur cette formule :

$$\text{Estimation}_{2017} = \text{Approximation} * \text{HeuresTravail} * (\text{Froid} * \text{CE} * \text{FroidJours} + \text{ResteFroid} * \text{NouvellePAC} * \text{FroidJours} + \text{ResteFroid} * \text{PAC} * \text{FroidJours} + \text{NouvellePAC} * \text{ResteJours} + \text{PAC} * \text{ResteJours})$$

Avec :

- Estimation2017 : Estimation de la consommation électrique en 2017 en tenant compte de la remise à neuf.
- Approximation : Approximation basée sur la consommation en 2015 ne tenant pas compte de la remise à neuf.
- HeuresTravail : Période de temps lorsque les pompes à chaleur fonctionnent, cela est de 12h par jour.
- CE – Electric Heater/Chaudière électrique : Il se réfère au coefficient de performance de travail rapportée à la puissance nominale de l'ancienne pompe à chaleur et la CE.
- PAC – Heat Pump/Pompe à chaleur : Il fait référence à l'ancienne PAC et son fonctionnement.
- NouvellePAC : Elle se réfère à la nouvelle PAC et son fonctionnement fait référence à la puissance nominale de l'ancienne PAC.
- Froid : Période dans une journée pour laquelle la température est inférieure à celle habituelle et par conséquent, le chauffage électrique se met en marche afin de produire la chaleur supplémentaire tout en constatant l'arrêt des pompes à chaleur.
- ResteFroid : Période dans une journée au cours de laquelle il ne fait pas assez froid de façon à ce que le chauffage électrique n'ait pas besoin de fonctionner.
- FroidJours : Cela fait référence aux journées d'hiver où la température est assez froide pour la CE pour commencer à fonctionner.
- ResteDays : Cela fait référence aux journées d'hiver où la température n'est pas assez froide pour la CE et les jours d'été.

Outre les calculs que nous avons réalisé pour l'estimation, nous avons également pris en compte le taux de travail des machines pour les différents mois de l'année que nous avons inséré dans le Tableau 4-3 (*Rapport de travail*). Donc, pour les mois d'hiver, le taux sera de l'ordre de 100% pour le chauffage. Lorsque nous atteignons le printemps, le taux de travail va varier entre 70% et 0% tant que les températures augmentent jusqu'à l'été, où le refroidissement va travailler à un taux de 70%. Puis, quand l'automne arrive, les températures baissent jusqu'à l'hiver.



Mois	Estimation (kWh)	Rapport de travail	Estimation (kWh)	Estimation Coût (€)
Janvier	367 391	100%	367 391	37 951
Février	312 340	100%	312 340	32 265
Mars	331 245	70%	231 871	23 952
Avril	300 467	50%	150 233	15 519
Mai	300 429	0%	189 745	19 601
Juin	276 591	70%	193 614	20 000
Juillet	300 982	70%	210 687	21 764
Août	300 959	70%	210 671	21 762
Septembre	260 214	0%	164 346	16 977
Octobre	240 096	50%	120 048	17 361
Novembre	270 289	100%	270 289	27 921
Décembre	312 853	100%	312 853	32 318

Tableau 4-3 : Estimation pour 2017

Si nous analysons les courbes de la Figure 4-5, nous nous rendons compte que la consommation électrique en 2017 par rapport à celle de l'électricité et du gaz en 2015 sont quelque peu différents. Au lieu d'avoir une courbe sur laquelle les périodes creuses sont pendant les mois d'hiver et les périodes pleines pendant l'été, nous voyons des pics qui apparaissent aussi pendant les mois d'été liés à la consommation d'électricité pour le refroidissement des bâtiments, effectuée par la nouvelle pompe à chaleur. Cela s'explique par le « Rapport de Travail » des pompes (cf. Tableau 4-4).

	2015		2017	
	Electricité	Gaz	Electricité	Gaz
<b>Production (GWh)</b>	2,2	3,1	2,7	0
<b>Coût (€)</b>	220	155	270	0

Tableau 4-4 : Comparaison découpée des consommations et des prix

Avec les consommations en 2015 et le résultat de l'estimation pour 2017, nous pouvons voir que nous réduisons la consommation totale, mais en même temps nous augmentons la consommation électrique. Comme le Tableau 4-5 résume, ce changement a un impact sur le prix que Siemens paiera après la mise à neuf.

Les taux pour le prix de l'électricité et du gaz ont été relevés des factures reçues par GEG et Cofely dans lequel nous pouvons constater que nous payons 0,10 €/kWh (électricité) et 0,05 €/kWh (gaz), en divisant le montant total de l'argent payé par la consommation de la facture.

Dans la figure ci-dessous, nous pouvons voir une comparaison entre les consommations en 2015 et l'estimation pour 2017.

L'évolution que nous voyons est une diminution du coût grâce à la suppression de la consommation de gaz, mais une augmentation de la facture de consommation d'électricité par rapport à celle de 2015 (cf. Tableau 4-5). Néanmoins, avec la mise à neuf du site, nous allons réaliser une économie de 115k€

Année	TOTAL (GWh)	TOTAL (k€)
2015	5,3	385
2017	2,7	270

Tableau 4-5 : Comparaison finales des consommations et des prix

Ainsi, nous pouvons voir dans la Figure 4-3 une comparaison économique entre les années 2015 et 2017 grâce à l'estimation faite pour l'année 2017.

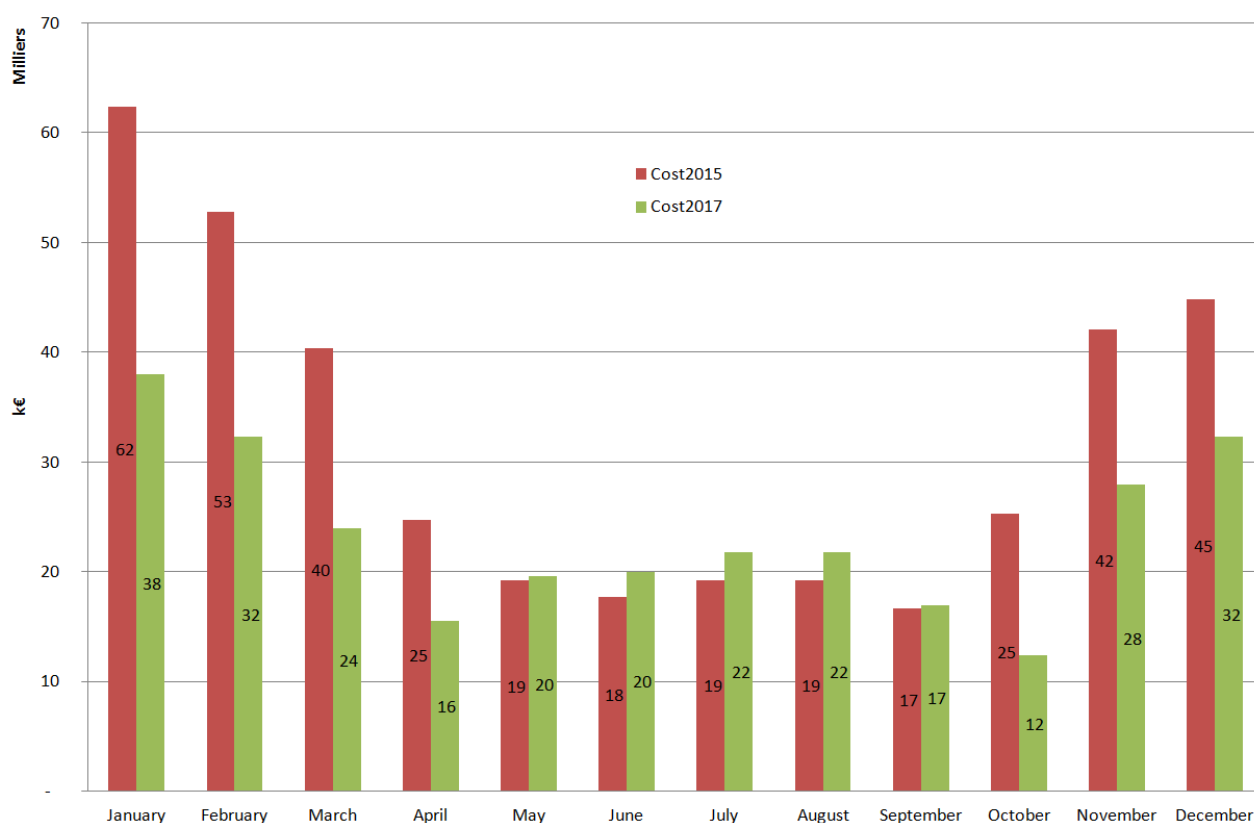


Figure 4-3 : Comparaison entre la consommation en 2015 et l'estimation pour 2017

## 4.2. WP2 – Production d'énergies renouvelables

C'est la partie dédiée à l'étude des différents moyens de production d'énergies renouvelables, les dimensions des technologies, leurs productions et leurs consommations d'énergie pour faire un rapport consommation/production du site.

Dans ce WP nous allons pouvoir voir les résultats des études réalisées par mon binôme où j'ai aidé à contacter les sociétés dont nous avons reçu les informations. Les trois technologies étudiées sont de type photovoltaïque, hydraulique et éolien.

La Figure 4-4 montre les endroits que nous allons considérer pour la mise en place des technologies nommées ci-dessus. Aussi, nous pouvons voir le reste des possibles mises en place que nous avons en tête pour le projet. Cette distribution n'est pas un résultat ni une décision finale.

Dans cette partie du projet, j'ai surtout travaillé sur l'obtention des données par rapport au flux de l'eau, le profil des dimensions dans le fleuve Isère et les fiches de spécifications des possibles technologies à mettre en place. Pour les obtenir, j'ai appelé et envoyé des courriels à différents acteurs chargés de gérer ces informations :

- Flux de l'eau : le Symbhi (Syndicat Mixte des Bassins Hydrauliques de l'Isère) nous a envoyé un lien du site web du Ministère de l'Écologie, du Développement Durable et de l'énergie où j'ai pu collecter les informations.
- Profil des dimensions (cf. Annexe 4) : l'AD Isère Drac Romanche, qui regroupe les délégués du Conseil général de l'Isère, ainsi que ceux des 68 communes et 14 Associations syndicales de propriétaires comprises dans le périmètre protégé.
- Technologies : J'ai contacté Hydroquest pour les hydroliennes, et quelques entreprises par rapport aux éoliennes (les échanges d'informations étaient en français et mon binôme ne parlant pas le français).

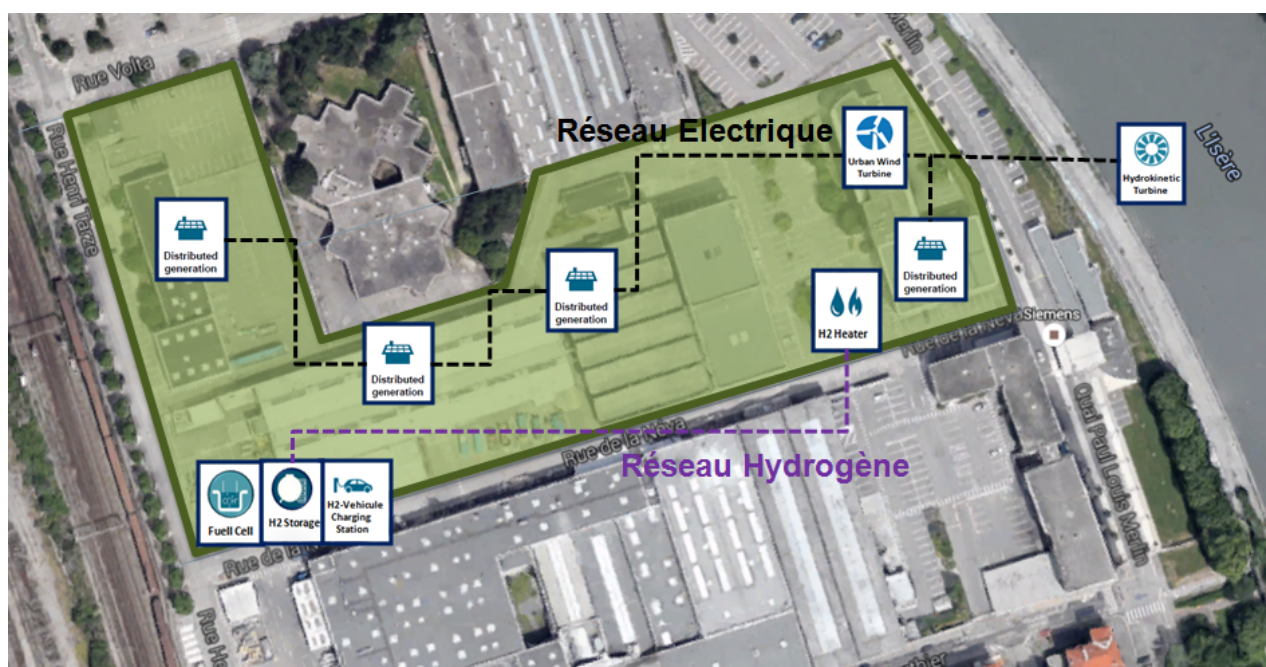


Figure 4-4 : Cartes de la distribution du démonstrateur dans le site

#### 4.2.1. Énergie photovoltaïque

La radiation solaire de Grenoble rend faisable l'étude pour la mise en place des technologies photovoltaïques. Dans l'Annexe 3, nous pouvons voir une comparaison entre trois types de technologies : Mono-Si, Poly-Si et Thin-film : Silice amorphe, Copper Indium Selenide (CIS) et Cadmium Telluride (CdTe).

Dans la Figure 4-5, nous pouvons voir que ce sont avec les panneaux Mono-Si que nous allons produire une plus grande quantité d'énergie, nous allons donc référer tous nos calculs à cette technologie (ce calcul a été fait avec la Formule 1).

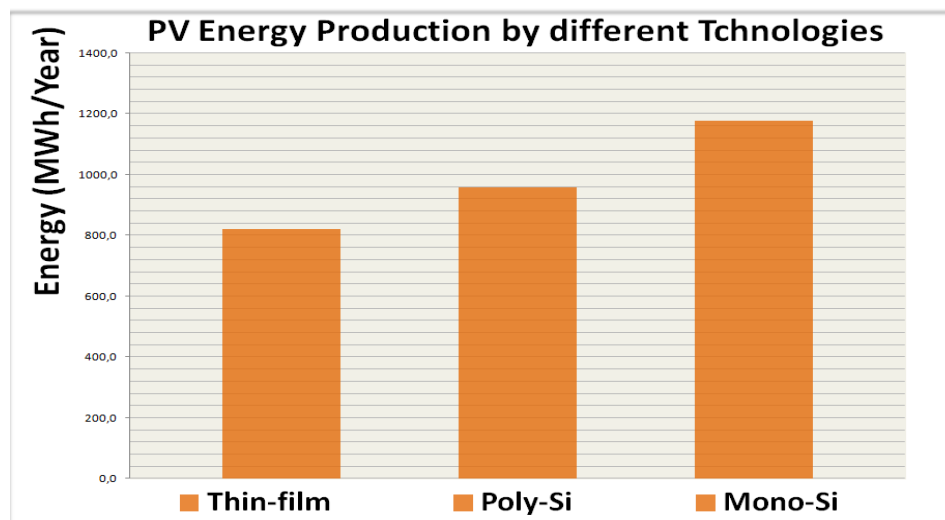


Figure 4-5 : Comparaison entre les différents types de panneaux PV

Les conditions qui ont été prises en compte sont les suivantes :

- Une superficie totale d'environ 7000 m<sup>2</sup> pour les toits et 1000 m<sup>2</sup> pour le parking
- Dans l'estimation de la puissance produite, le facteur de l'ombrage n'a été pas pris en compte
- Les données ont été prises du site web de la NASA, ce sont donc des données fiables
- Considération d'un angle de position de 20° par rapport aux surfaces horizontales où les panneaux vont être placés (toits et parking)
- Raccordement des modules en série pour une tension de 500-600 V et des lignes en série en parallèle pour réussir à avoir une puissance dès 250 à 800 kW

Finalement, grâce à la Formule 1 on a obtenu la production d'énergie photovoltaïque du futur :

$$E = A * r * H * PR \quad (1)$$

E = Energie (kWh)

A = Surface totale des panneaux (m<sup>2</sup>)

r = Efficacité des panneaux (%)

H = Moyenne de la radiation solaire annuelle (sans tenir en compte l'ombrage)

PR = Rapport de performance, coefficient de pertes

Dans la Figure 4-6 et l'Annexe 3, nous pouvons voir l'estimation de la production de l'énergie en prenant en compte des espaces disponibles sur les toits. Sur la Figure 4-7 nous pouvons voir également l'estimation de la production avec des panneaux montés en plateformes sur le parking.

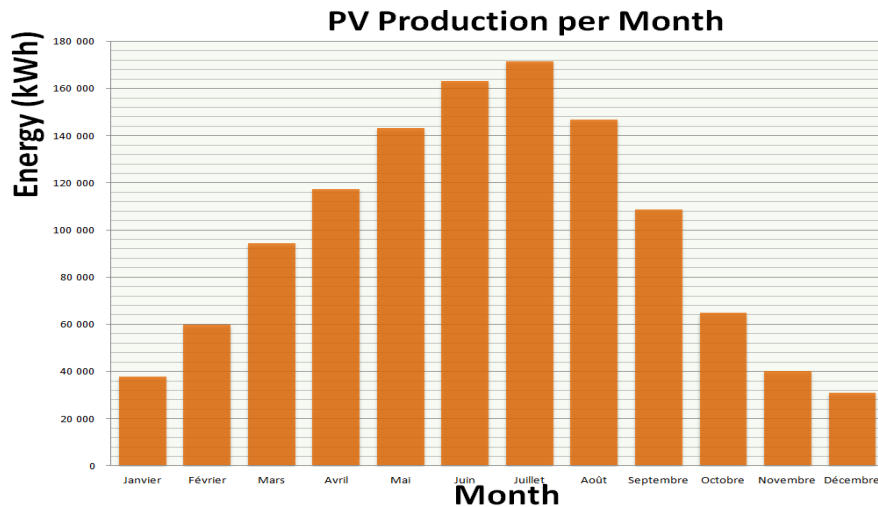


Figure 4-6 : Production d'énergie avec panneaux sur les toits

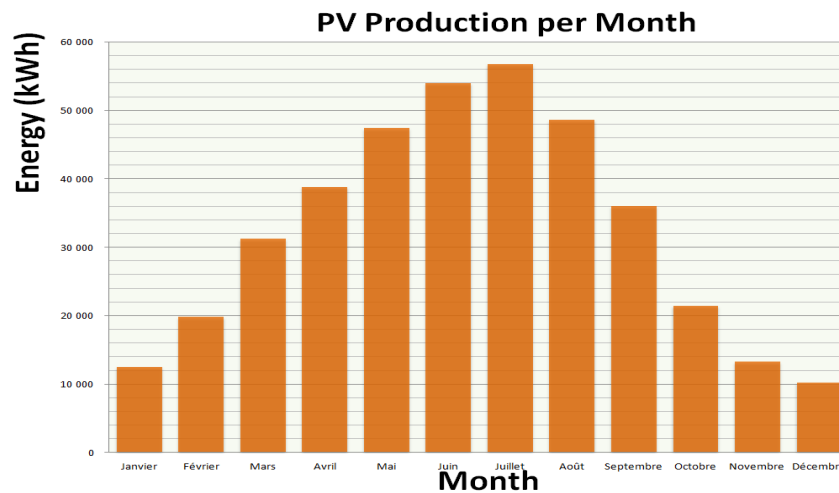


Figure 4-7 : Production d'énergie avec panneaux sur le parking

#### 4.2.2. Energie hydraulique

L'énergie hydrocinétique (l'énergie du mouvement de l'eau) du fleuve est capturée par des turbines hydrauliques ou hydroliennes et ensuite transformée en énergie électrique. Nous avons remarqué que la puissance du flux est assez forte pour que les hydroliennes puissent être mis en place.

Grâce aux calculs réalisés par mon binôme, nous obtenons que la surface est égale à 107m<sup>2</sup>. Avec cette information et celles des flux, et avec la Formule 2, nous calculons un profil de la vitesse d'écoulement du fleuve, montré sur la Figure 4-8.

$$Q=A*V \quad (2)$$

Q est le flux (m<sup>3</sup>/s)

A est la surface en perpendiculaire au flux (m<sup>2</sup>)

V est la vitesse d'écoulement de l'eau (m/s)

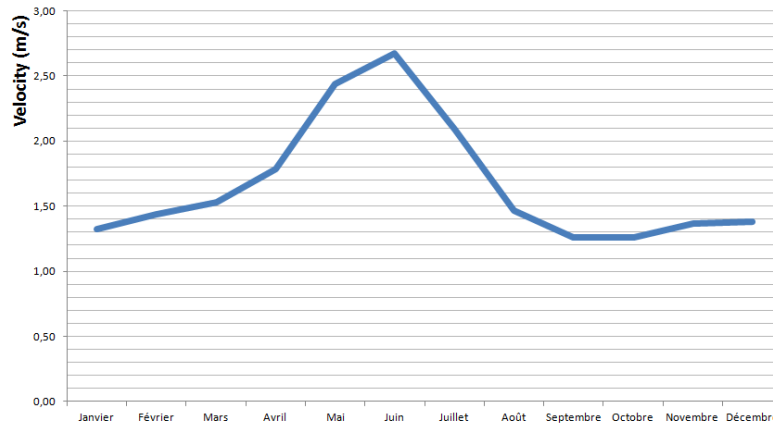


Figure 4-8 : Vitesse d'écoulement du fleuve Isère

Ensuite, la puissance est calculée avec la Formule 3, où  $\rho$  est la densité de l'eau,  $\eta$  le rendement de la turbine et  $C_p$  le coefficient de puissance (rapport entre l'électricité produite avec une turbine et l'énergie totale disponible dans l'eau)

$$P = \frac{1}{2} * \eta * \rho * A * V^3 * C_p \quad (3)$$

Par rapport à la puissance, il faut savoir quelles sont les caractéristiques des hydroliennes pour les mettre dans la formule. Nous avons choisi quatre types de turbines de trois fabricants différents (cf. Annexe 5), mais les turbines Hydroquest 40 vont être éliminées de l'étude suite à sa taille importante pour le profil du fleuve. Dans l'Annexe 5 nous pouvons également voir une comparaison numérique entre les productions possibles selon chaque turbine.

Finalement, pour nos besoins, nous allons mettre en place la turbine SmartHydro de 5 kW. Dans la Figure 4-9 nous pouvons voir l'estimation de la production par rapport aux conditions de la partie de l'Isère à côté du site Siemens.

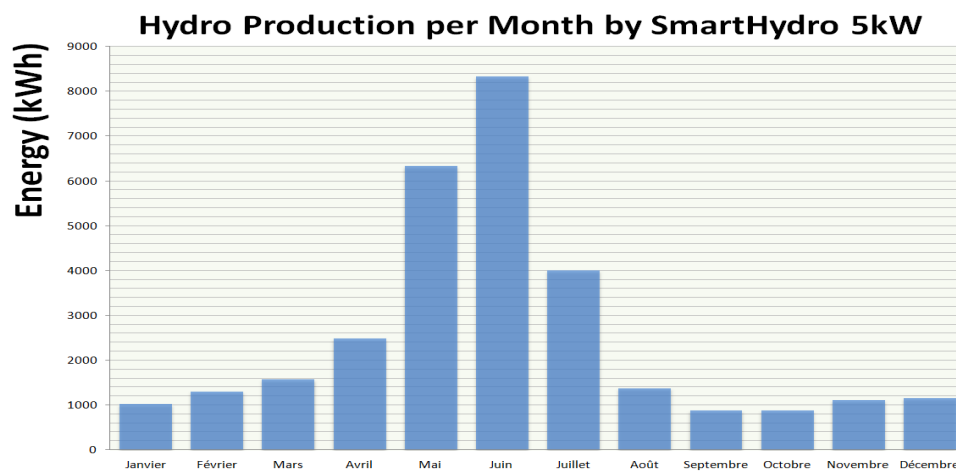


Figure 4-9 : Estimation de la production hydraulique

### 4.2.3. Energie éolienne

Pour faire l'estimation de la production d'énergie électrique grâce aux éoliennes et en sachant que c'est aussi une turbine, nous allons utiliser la formule 3. Dans l'Annexe 6 un tableau permet d'estimer de la production pour une hauteur de 12m avec une turbine Aeolos d'axe horizontal de 5kW.

### 4.2.4. Rapport consommation-production

Finalement, dans la Figure 4-10, je vous montre le rapport obtenu entre la consommation et la production d'énergies renouvelables. Ici, nous pouvons voir que c'est surtout pendant les mois d'été où la production est vraiment rentable pour le site.

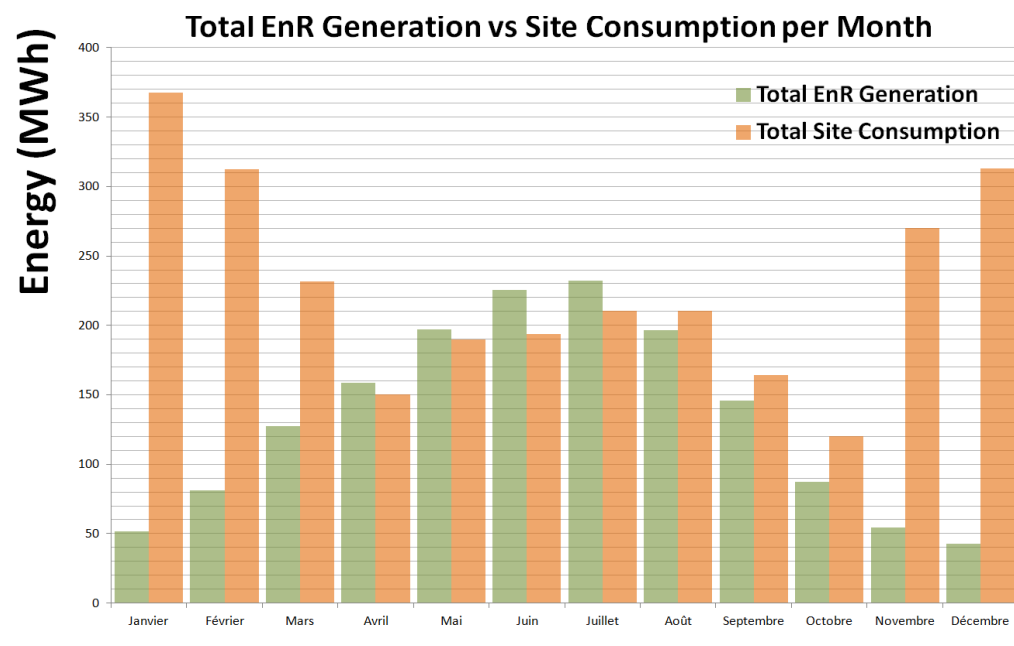


Figure 4-10 : Rapport consommation-production

## 4.3. WP3 – Stockage d'énergie

Dans cette partie, je vais expliquer les différents moyens de stockage d'énergie, soit pour l'énergie électrique ou pour l'hydrogène. Pour me référer à la partie de l'hydrogène, je vous explique dans un premier temps comment nous allons le produire et les différentes options que nous avons par rapport à cette fraction du projet.

Deux produits Siemens peuvent être utiles pour cette tâche : un Silyzer, système de production d'hydrogène, et le Siestorage, appareil de stockage d'énergie électrique. Pour le stockage de l'hydrogène, nous allons utiliser les technologies d'autres entreprises comme Ataway si nous choisissons le petit Silyzer ou Air Liquide en cas que nous décidons de produire de l'hydrogène à grande échelle.

### 4.3.1. SILYZER

#### 4.3.1.1. Production

Il s'agit d'un électrolyseur PEM (Proton-Exchange Membrane), qui est un système extrêmement dynamique et robuste qui suit avec précision tous les profils du vent et solaires avec un encombrement faible. Pour ce projet, nous avons deux SILYZERS différents par rapport à leur taille, et à leur capacité de production, puisque différents usages de l'hydrogène peuvent être mis en place (ex. : petite production pour la propulsion de voitures hybrides ou une production beaucoup plus importante pour la propulsion de quelques bus d'une ligne passant à côté du site Siemens – cf. 4.3.1.1.1. Véhicules). Ici, nous allons exposer les caractéristiques de chacun d'eux:

PUISSANCE	25 kW	1,25 MW
PRODUCTION D'H <sub>2</sub> (kg/jour)	10,8	5480
SURFACE TOTALE (m <sup>3</sup> )	1,2 x 1 x 0,3	6,5x3x3
INVESTISSEMENT	20 k€	1,5 – 2 M€
PRESSION (bar)	Jusqu'à 35	Jusqu'à 35
PRODUCTION D'H <sub>2</sub> (Nm <sup>3</sup> /h)	98,4	5400

Tableau 4-6 : Caractéristiques des différents SILYZERS

Sachant que l'hydrogène a la plus forte densité d'énergie, le processus pour sa production est le suivant:

1. Insertion de l'énergie électrique, soit du réseau ou produite grâce aux technologies de production d'énergies renouvelables, et de l'eau pour la fission des molécules et de la production de l'hydrogène.
2. La membrane PEM va séparer les molécules d'O<sub>2</sub> des molécules de H<sub>2</sub> de l' H<sub>2</sub>O injectés. Les molécules de H<sub>2</sub> seront placées dans le stockage : intermédiaire, c'est-à-dire, les réservoirs sous pression.
3. Production du carburant pour le transport ou le chauffage, qui sera produit sans CO<sub>2</sub> et permettra un ravitaillement rapide.

Pour avoir une idée approximative de la quantité totale d'hydrogène produite pour calculer le stockage, nous allons utiliser les données du Tableau 4-7 pour transformer les informations nécessaires.

Maintenant, par un calcul simple, je vais obtenir un volume donné, qui sera corrigé ultérieurement avec les valeurs du tableau suivant :

kg H <sub>2</sub> /h	↔	Nm <sup>3</sup> H <sub>2</sub> /h	↔	l H <sub>2</sub> /h *	↔	kW
<b>1</b>	=	11,12	=	14,12	=	33,33
<b>0,0899</b>	=	1	=	1,270	=	3,00
<b>0,0708</b>	=	0,788	=	1	=	2,359
kg H <sub>2</sub> /h	↔	Nm <sup>3</sup> H <sub>2</sub> /h	↔	l H <sub>2</sub> /h *	↔	kW



<b>0,0300</b>	=	0,333	=	0,424	=	1
---------------	---	-------	---	-------	---	---

\* L'hydrogène liquide à la pression atmosphérique au-dessous de -252,8 °C

Tableau 4-7 : Equivalences de l'hydrogène

Le terme « Nm<sup>3</sup> » s'applique uniquement à la condition normale à 1 atm et 0 °C, donc pour pouvoir procéder à l'obtention de la production en conditions normales et donc pouvoir bien mesurer le stockage, je vais appliquer la formule suivante :  $P * V = n * R * T$ , l'équation des gaz parfaits, pour recalculer le volume en tenant compte du fait que la pression (P), le nombre de moles (n) et la constante des gaz (R) ne varient pas, ce qui nous permettra d'atteindre la formule suivante:

$$\frac{V_1}{T_1} = \frac{V_2}{T_2} \quad (4)$$

Grâce à cette équation, nous allons pouvoir calculer la valeur absolue en Nm<sup>3</sup> d'hydrogène que le SILYZER va produire et puis calculer les dimensions du réservoir de stockage.

En fonction de la quantité d'hydrogène que nous souhaitons produire, nous serons confrontés à des tailles différentes pour le stockage. Dans le cas de l'utilisation de la plus petite SILYZER, nous installons un réservoir d'environ 100 m<sup>3</sup> à 35 bar. Dans le cas contraire, si la production est la plus élevée, la taille du réservoir serait de 5400 m<sup>3</sup> à la même pression.

#### 4.3.1.2 Consommation

Une fois que nous allons produire et stocker l'hydrogène, nous devons l'utiliser comme un moyen de production d'énergie. Deux façons de l'utiliser peuvent être mises en place : la propulsion de véhicules, dont je vais parler par la suite, ou la production de la chaleur pour le chauffage.

##### 4.3.1.2.1. Véhicules

Pour le cas des voitures, nous avons appris en discutant avec des spécialistes que la consommation d'hydrogène estimée pour une voiture est d'environ 1,2 kg pour 100 km.

Pour les bus, nous avons trouvé des informations selon lesquelles la consommation d'hydrogène est estimée de 10 à 14 kg d'hydrogène pour 100 km. J'ai étudié le pire scénario afin d'avoir une estimation positive et donc ne pas manquer de carburant en milieu de journée.

Je vais commencer avec le cas des bus, et avec les informations concernant la ligne de bus C1, nous abordons le résultat suivant (en ce qui concerne l'utilisation de l'hydrogène comme combustible):

- 105 voyages par jour (le pire scénario, nous prenons en compte la plus grande fréquence de passage de bus)

- 20 km par voyage aller-retour
- 0,14 kg H<sub>2</sub>/ km

$$\text{Consommation} * \text{Distance parcourue} = \text{Consommation par aller-retour} \quad (5)$$

$$0,14 \text{ kg H}_2 / \text{ km} * 20 \text{ km} / \text{ tour} = 2,8 \text{ kg H}_2 / \text{ tour} \quad (6)$$

En ce qui concerne le cas des voitures, nous étudierons la consommation d'une seule voiture et en fonction de cette information, nous serons en mesure de définir ensuite le nombre de voitures à utiliser et la quantité de H<sub>2</sub> nécessaire.

Les voitures étudiées sont des voitures hybrides, c'est-à-dire, elles ont une autonomie totale de 320 km dont 160 km sont fournis par l'énergie électrique du réseau et 160 km par la propulsion de l'hydrogène. Étant donné que la consommation d'une seule voiture est d'environ 0,012 kg H<sub>2</sub> / km et l'autonomie maximale est de 160 km, nous atteignons le résultat suivant:

$$0,012 \text{ kg H}_2 / \text{ km} * 160 \text{ km} / \text{ retour} = 1,92 \text{ kg H}_2 / \text{ voyage} \quad (7)$$

Maintenant que nous connaissons la quantité de H<sub>2</sub> que nous devons utiliser pour une seule voiture, nous pouvons obtenir le meilleur résultat possible, à partir de notre capacité d'intégration des technologies.

#### 4.3.1.2.2. *Chauffage catalytique*

Ce type de technologie a été pensé soit pour le chauffage de l'eau des laboratoires ou pour le chauffage d'un des bâtiments. Finalement, nous avons pensé que c'était plus intéressant de mettre en place les véhicules, puisque c'est un moyen plus visible de montrer le démonstrateur. Les calculs sont, quand bien même, disponibles ci dessous.

A partir des informations données par GIACOMINI, entreprise qui fournit ce type de matériel, nous avons extrait la consommation d'hydrogène à puissance nominale: dont la valeur est 1,67 Nm<sup>3</sup>/h. Avec la conversion suivante, nous avons obtenu le résultat d'une possible consommation quotidienne d'hydrogène:

$$1,67 \text{ Nm}^3 \text{ H}_2 / \text{ h} * 0.0899 \text{ kg H}_2 / \text{ Nm}^3 \text{ H}_2 * 12 \text{ h} / \text{ jour} = 1,8 \text{ kg H}_2 / \text{ jour} \quad (8)$$

Par la suite, je vais vous parler du stockage de l'hydrogène : L'hydrogène peut être stocké physiquement, soit à l'état gazeux ou à l'état liquide. Le stockage de l'hydrogène à l'état gazeux nécessite généralement des réservoirs à haute pression (pression du réservoir 350-700 bar). Le stockage de l'hydrogène sous forme liquide nécessite des températures cryogéniques parce que le point d'ébullition d'hydrogène à une pression atmosphérique est à -252,8 °C.

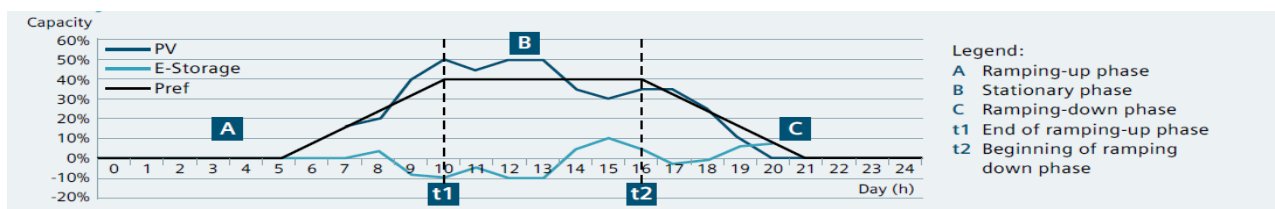
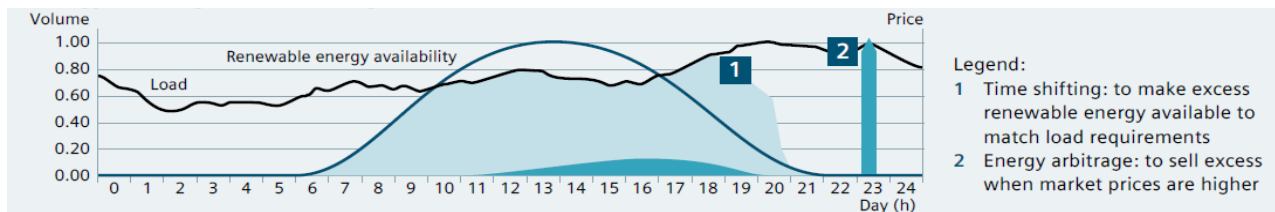
Bien que l'hydrogène liquide à basse pression, à proximité du point d'ébullition de -253,15 °C, soit couramment utilisé pour le stockage d'hydrogène en masse et celui du transport, il existe

actuellement peu d'activité dans le développement pour une utilisation automobile à bord. Bien que l'hydrogène comprimé soit généralement stocké à une température proche de la température ambiante (sous-ambiante mais supérieure à  $-123,15\text{ °C}$ ) "froid" et "cryogénique" ( $-123,15\text{ °C}$  et en dessous), le stockage de l'hydrogène comprimé est à l'étude dans le monde cryogénique en raison des densités d'hydrogène les plus élevées qui peuvent être obtenues à des températures réduites.

#### 4.3.2. SIESTORAGE

J'ai découvert qu'il existe deux possibilités de mise en place selon le type de réseau que nous souhaitons mettre en place:

1. **Soutenir l'intégration de production d'énergies renouvelables** : le défi consiste à mieux utiliser et gérer les énergies renouvelables. Les sources d'énergies renouvelables intermittentes constituent un défi pour les producteurs d'électricité et les opérateurs des réseaux. Alors que les producteurs d'électricité cherchent idéalement à vendre de l'électricité aux heures de pointe de la demande, lorsque les prix sont les plus élevés, les opérateurs des réseaux ont besoin de soutenir sa stabilité à tout moment. Compter sur la production conventionnelle en accélérant pour neutraliser la variabilité et en ralentissant pour soutenir la charge est une solution coûteuse. Elle se traduit par un vieillissement prématuré de l'équipement conçu pour fonctionner en permanence et à proximité de ses caractéristiques de conception opérationnelles. En outre, les opérateurs du réseau imposent des règles strictes de connexion liées aux taux de rampe et à la prévision, la planification et la répartition. Dans ce scénario, SIESTORAGE fournit une solution pour optimiser l'utilisation des énergies renouvelables tout en réduisant les coûts et en améliorant la stabilité du réseau.



2. **Soutenir l'intégration des microgrids** : le défi consiste à améliorer l'efficacité et la qualité du service. Qu'ils soient situés sur des véritables îles géographiques ou simplement isolés

au sein d'un complexe industriel ou d'une infrastructure, les microgrids peuvent être raccordés ou non au réseau de distribution, mais dans les deux cas ils doivent être autonomes et être en mesure de fonctionner de façon autonome. Les microgrids contiennent souvent un mélange complexe de variables, de l'énergie renouvelable intermittente et des générateurs diesel à réponse lente qui, du aux rampes, ne fonctionnent pas avec une efficacité optimale; ce qui rend le coût de fonctionnement élevé et produit des émissions supplémentaires. Les opérateurs des microgrids sont donc confrontés au défi de maintenir le réseau stable et d'offrir une bonne qualité de service tout en minimisant les coûts et en réduisant la pollution.

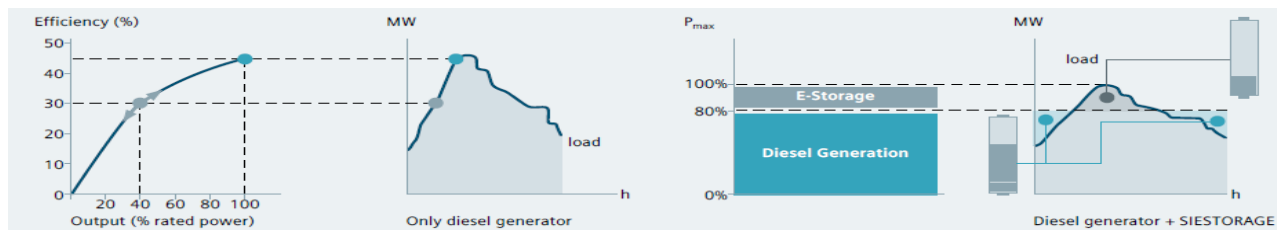


Figure 4-13 : Optimisation de la performance d'un générateur diesel

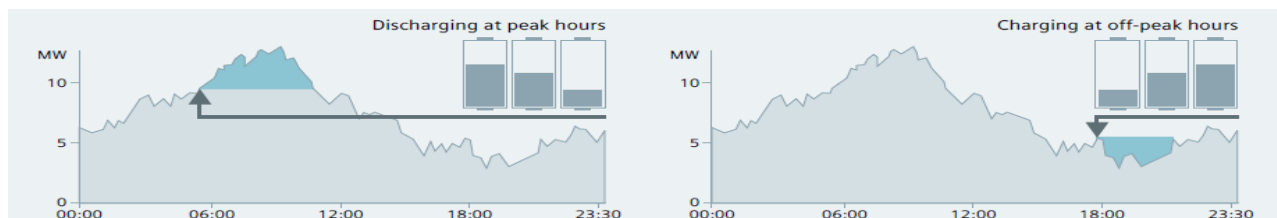


Figure 4-14 : Amélioration de la gestion du pic de la charge et du coût d'efficacité grâce à l'équilibre de la fourniture et de la demande d'énergie

#### 4.4. WP4 – Dimensionnement

Par la suite, nous avons décidé d'élaborer des scénarios avec le logiciel Homer, utilisé par mon binôme, pour mieux montrer les caractéristiques des possibles ensembles de technologies. Les scénarios montrent un ensemble de différentes compositions suite aux études faites précédemment dans les distincts WP. Dans le Tableau 4-8 et l'Annexe 7 nous pouvons voir les différentes configurations que nous avons étudié pendant le stage, ainsi que les calculs par rapport à l'énergie et l'H2 produites et consommées.

Dans le tableau de l'Annexe 7, les scénarios du premier (1) au septième (7) ont été créés suite au premier retour d'expérience. La deuxième étape (cf. Annexe 7) va du vingt-et-unième (21) au vingt-troisième (23) et, dans le Tableau 4-8, la troisième du trente-et-unième (31) au trente-cinquième (35) et celles-ci constituent des études un peu plus précises que les précédentes. Comme montré dans le Tableau 4-9 et le tableau de l'Annexe 8, quelques calculs par rapport à la taille du réservoir d'hydrogène, la production et la réduction de l'impact du CO2 et le Return On Investment (ROI) des scénarios.

Suite aux différents besoins, nous allons mettre en place les technologies que nous avons étudiées pendant ces 6 mois et d'autres dont nous avons juste demandé des informations complémentaires par rapport aux caractéristiques. Ces autres technologies sont :

- Pile à combustible (Fuel-Cell) : pour la transformation de l'H<sub>2</sub> en énergie électrique en cas de panne. La pile à combustible peut être aussi utilisée dans le cas où il serait intéressant de réinjecté l'énergie au réseau.
- Voitures électriques : nous avons cherché quelques informations par rapport aux voitures électriques en général pour faire les études. Nous n'avons contacté aucun fabricant.

Scénario	Components	Energie produite (GWh/année)	Energie consommée (GWh/année)	H2 produit (kg/jour)	H2 consommé (kg/jour)
31	*4 voitures H2 *4 voitures électriques (e) *Silyzer 25 kW *Tank d'H <sub>2</sub> 10 kg	1,2	2,9	11	8
32	Juste EnR	1,2	2,7	-	-
33	Juste EnR et PV parking	1,6	2,7	-	-
34	*3 buses pour la ligne C1 *Silyzer 200 kW *Tank d'H <sub>2</sub> 90 kg	1,2	5,1	90	84
35	*2 buses pour la ligne C1 *Silyzer 200 kW *Tank d'H <sub>2</sub> 60 kg	1,2	4,7	60	55

Tableau 4-8 : Troisième étape de scénarios

Scénario	Taille du réservoir (m <sup>3</sup> )	CO <sub>2</sub> produit (tonne/année)	Réduction de l'impact du CO <sub>2</sub> (tonne/année)	ROI (années)
31	5	120	50	8
32	-	120	50	7
33	-	150	50	7,5
34	28	1400	>310	125
35	19	930	>225	75

Tableau 4-9 : Réservoir, production de CO<sub>2</sub> et Return On Investment

Pour expliquer la partie ROI (cf. Tableau 4-11), je vais exemplifier avec le scénario 31. Dans le Tableau 4-10 nous pouvons observer les différentes technologies qui vont être mises en place avec la production et la consommation d'énergie, ainsi que les possible partenaire/fournisseurs, les prix d'achat et les équivalences en CO<sub>2</sub>.

	Technologies	Usages	Energie Produite	Energie Consommée	Coût (€)	Fournisseur /Partenaire	CO <sub>2</sub> équiv. (tonne)	CO <sub>2</sub> économie (tonne)
Prod.	Photovoltaïque	-	1,2 GWh/année		1 M	VOLTEC		
	Hydrolienne	4 turbines	0,030 GWh/année		60 k	Hydroquest	20	-
	Eolienne	1 turbine	0,0002 GWh/année		20 k	AEOLOS		
	Silyzer (adapté)	4 Cars	10 kg H <sub>2</sub> /jour	600 kWh/Day	25 k	SIEMENS	0	0
Cons.	Site	-	1,2 GWh/année	2,7 GW/année	220 k	SIEMENS	100	50
	Voitures	4 Hybrid cars-360 km (H <sub>2</sub> +e)		2 kg H <sub>2</sub> /jour 25 kWh/jour	124 k	Symbio F Cell	0	10,7
		4 e cars-50 km	-		90 kWh/jour	63 k	?	0
	Stations de recharge (voitures e)	4 e cars			5 k	?	?	?
	Stations de recharge (voitures hybrides)	H <sub>2</sub> Cars			75 k	Atawey	0	0

Tableau 4-10 : Résumé du scénario 31

	Présent (k€)	Futur (k€)	ROI (années)
Coût	375	170	8,05
Investissement		1650	

Tableau 4-11 : Return on Investment du scénario 31

Finalement, nous pouvons voir que suite à la mise en place de cette combinaison, nous obtenons un ROI d'à peu près 8. C'est-à-dire, nous allons récupérer l'investissement que nous allons faire par rapport à ce scénario dans moins de 8 ans et demi. Dans la partie « Investissement » nous avons pris en compte les coûts pour chaque matériel et les coûts d'exploitation et maintenance pendant 25 ans.

Par la suite, pour la dernière étape de scénarios, j'ai créé des cartes de partenaires/fournisseurs afin de voir la meilleure façon de gérer le projet. Pour continuer avec l'exemple, dans la Figure 4-15 je vous montre celle que j'ai fait pour le scénario 31.

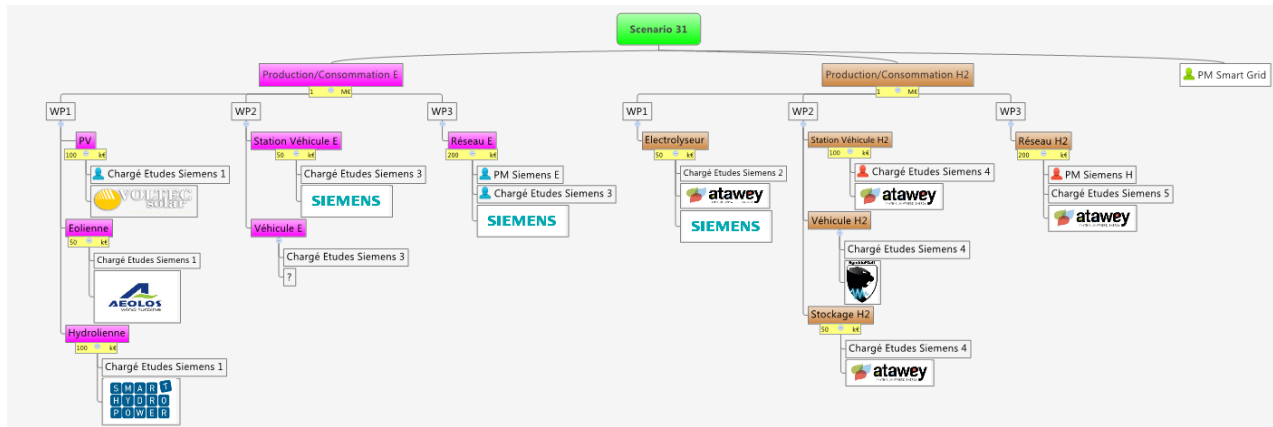


Figure 4-15 : Carte des partenaires/fournisseurs pour le scénario 31

#### 4.4. Résultats

De nombreuses réunions ont été organisées, presque chaque semaine, pour mieux suivre les travaux effectués autour de ce projet. Finalement, grâce aux scénarios, nous pourrions décider quelle est la composition la plus intéressante à mettre en place. Les perspectives par rapport à cette partie du projet vont être étudiées encore 2 mois durant, et une conclusion concernant les réglementations environnementales sera apportée. Par la suite je vais faire une comparaison entre la dernière étape des scénarios, montré dans le Tableau 4-8, avec les dernières configurations étudiées.

Il est remarquable que les scénarios les plus rentables sont le 32 et le 33 parce qu'ils utilisent uniquement des technologies renouvelables. Avec un ROI de 7 et 7,5 ans, il est plus facile de concurrencer contre des ROI de 75 et 125 ans, par rapport à ces scénarios qui mettent en place l'option de l'hydrogène pour propulser 2 ou 3 bus. De toute façon, le prix du vent de l'hydrogène n'a pas été pris en compte, donc les résultats pour le ROI des scénarios 34 et 35 devraient être inférieurs à ceux que nous avons calculés. Il est aussi intéressant de montrer aux gens la possibilité d'avoir un combustible qui ne pollue pas, propre à l'environnement, et de les aider à changer d'avis par rapport au transport que nous connaissons de nos jours.

Vu que le projet s'agit d'un démonstrateur, l'option la plus intéressante est celle qui met en place la production d'hydrogène, ainsi que la production et la consommation d'énergie électrique. Pour la production de l'hydrogène nous allons mettre en place un électrolyseur de Siemens (SILYZER) et l'hydrogène produit sera stocké dans un réservoir de 5m<sup>3</sup>, qui pour finir servira pour la propulsion de 4 voitures hybrides (moitié électricité, moitié hydrogène). L'énergie électrique, soit celle du réseau ou celle que nous allons produire avec les technologies renouvelables, sera utilisée pour la consommation des bâtiments et la propulsion de quatre voitures électriques ainsi que la partie électrique des voitures hybrides. En tenant compte que le ROI n'est pas forcément élevée (juste 8 ans) et que nous pouvons aussi montrer presque toutes les technologies innovantes que nous avons étudiées leur efficacité, le scénario 31 est sans doute le scénario le plus optimisé.

## 5. Conclusion

Les missions du stage étaient de définir le schéma énergétique globale, l'identification des possibles partenaires et/ou clients en dépendant du la configuration finale souhaitée et de réaliser la documentation du projet. Pendant ces 6 mois de stage PFE, nous avons réalisé plus d'un tiers du travail prévu pour une durée de 8 mois.

Pendant la durée de ce Projet Fin d'Etudes, j'ai pu gérer différentes parties du projet. Comme montré précédemment, dans les WP 1 et 3 j'ai du faire plusieurs réunions avec différents fabricants afin de collecter des informations par rapport à ces produits. Pour réaliser les estimations et la mise en forme de la documentation du projet, j'ai utilisé différents logiciels du pack Microsoft Office. Pour estimer les données de la consommation future et les ROI à partir des données acquises grâce au logiciel Homer, j'ai utilisé le logiciel Excel, où j'ai créé des tableaux, des courbes et des fiches de résumé pour les différents scénarios. Le logiciel Word a été utilisé pour la mise en forme des documents informatifs correspondants aux calculs numériques et graphiques. Puis le logiciel PowerPoint a servi comme résumé des informations écrites sur Word. De plus, les logiciels XMind, pour la gestion des cartes de partenaires/fournisseurs, et Visio pour la création de diagrammes de production/consommation d'hydrogène SANKEY ont été utilisés.

Comme défini dans la dernière partie, après une comparaison entre les différents scénarios en précisant les avantages et contraintes de chaque mise en place, avec mon binôme, nous avons décidé que la configuration la plus intéressante à mettre en place est celle qui inclue : la production d'énergies renouvelables, la production d'hydrogène, le stockage des différents moyens énergétiques et la propulsion de voitures hybrides pour la promotion de l'utilisation des énergies propres. Avec un Return On Investment (ROI) d'environ 8, qui est plus élevé que les scénarios où on ne prenait en compte que la mise en place des technologies renouvelables, et un ROI beaucoup plus inférieur que ces scénarios où on voulait montrer l'usage de l'hydrogène à grande échelle, le scénario 31 met en place un ensemble de technologies parfaitement cohérent qui montrerait à la société le futur de l'énergie.

Prochainement, et comme je l'ai mentionné précédemment, il reste quelques aspects pour la finalisation du projet. La réglementation environnementale est un de ces aspects à traiter prochainement. Cette partie sera gérée par un des responsables de projet de Siemens. Aussi, comme mentionné dans la partie 3.1.2. *Planification*, la durée de la mise en place du démonstrateur est d'environ 4 ans et demi. D'autres perspectives comme la mise en place des autres démonstrateurs restent à décider.



## 6. Retour d'expérience

J'ai beaucoup appris tant professionnellement que personnellement. Du côté professionnel, j'ai appris à gérer les temps de finalisation des différentes parties du projet et à analyser rapidement un problème exposé, enfin, j'ai mis en place une méthode pour gérer la solution.

Ce stage de fin d'étude m'aura finalement permis de découvrir l'univers de la gestion de projet en entreprise et celui d'un bureau d'étude industriel. J'ai pu observer le fonctionnement d'un département de recherche et développement au sein de Siemens. De plus j'ai également pu développer de nouvelles compétences en techniques de bureau d'étude, comme la méthodologie à suivre pour la documentation d'un projet ou les différentes étapes d'un processus d'étude.

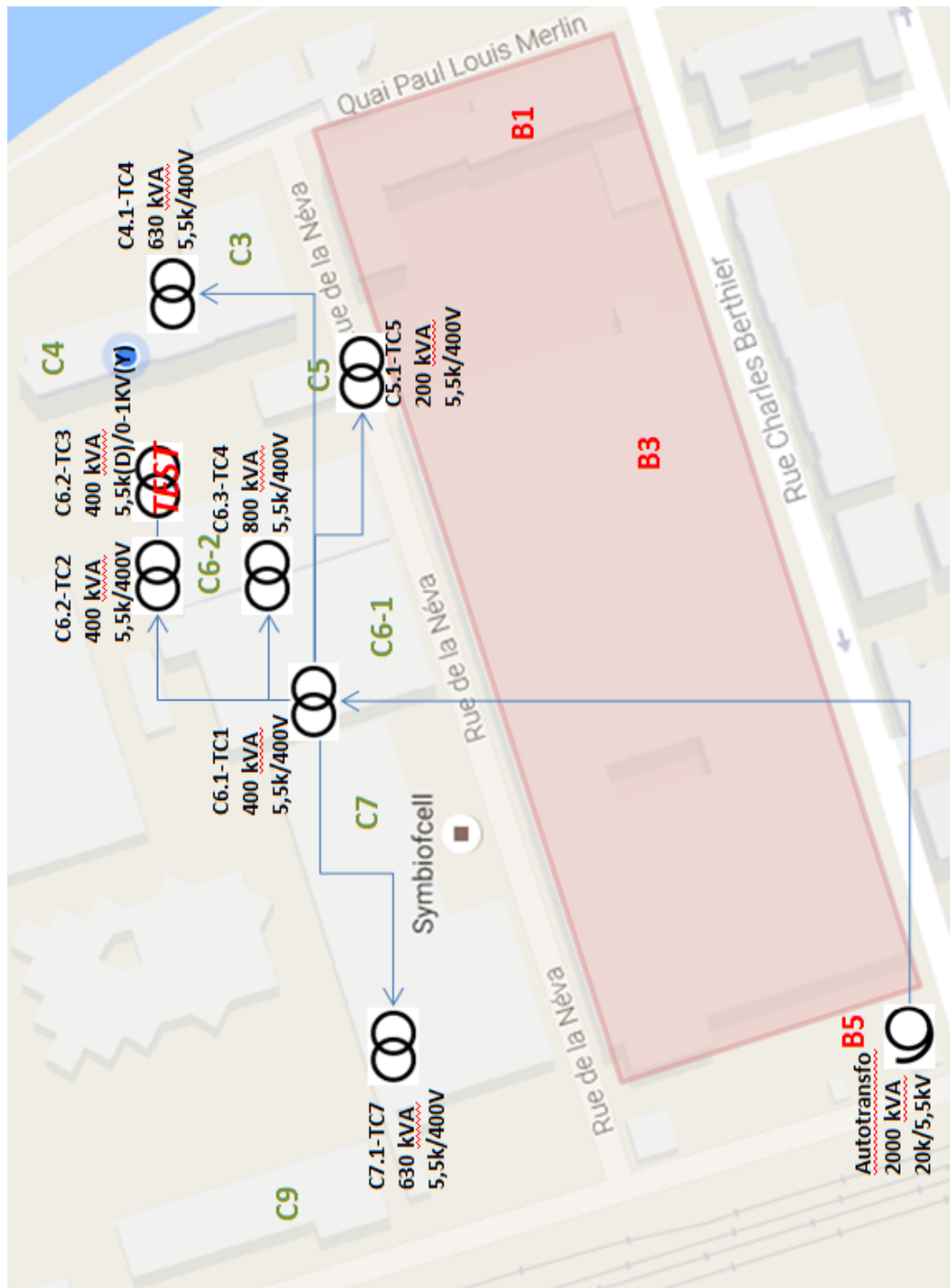
Du point de vue personnel, j'ai travaillé dans un milieu industriel dans lequel j'ai rencontré plusieurs types de personnalités dans les différentes fonctions dans le bureau d'étude, ce qui m'a appris la communication dans le milieu professionnel. Je me suis intégré facilement et j'ai pu travailler dans un projet intéressant et révolutionnaire avec une équipe de travail expérimentée. Ce stage m'a aussi permis de prendre d'avantage confiance en moi, notamment grâce à mon tuteur qui a été très motivant et dont j'ai beaucoup appris grâce à son expérience. Cette expérience a réellement confirmé mon choix par rapport au parcours d'énergies renouvelables en Espagne.

Au cours du stage, j'ai pu utiliser les connaissances acquises durant ma formation pour simplifier de manière cohérente les erreurs de calcul et pour garder un résultat le plus précis possible, tout en s'adaptant aux capacités de calcul mises à disposition.

Néanmoins, il reste encore quelques points qu'il est possible d'améliorer car certaines étapes comme la communication avec les entreprises a été gérée par des personnes avec plus d'expérience au sein de Siemens. Dans l'avenir, il sera possible d'affiner les résultats du projet avec l'acquisition d'informations plus précises par rapport à la réglementation environnementale. Aussi, une fois que toutes les technologies seront mises en place, nous pourrons savoir exactement si les calculs faits pour les estimations de la production et de la consommation ont été bien réalisés.

# ANNEXES

## Annexe 1 : Carte des principaux transformateurs et sa puissance en 2017.



## Annexe 2 : Carte des connexions des transformateurs avant la mise à neuf du site.



## Annexe 3 : Comparaison des différentes technologies photovoltaïques

Types	Efficacité théorique	Efficacité pratique	Résistance à la température	Avantages	Contraintes
Mono-Si	25%	15-20%	A hautes températures, la performance diminue de 10-15%	Plus efficace, efficacité pour les espaces peu grands, longue vie, faisable pour conditions de peu ensoleillement.	Plus cher, pire performance par rapport aux hautes températures.
Poly-Si	19-20%	12-16%	Moins résistante à la température que Mono-Si	Moins cher, moins de silice dans le processus de production.	Moins efficace que Mono-Si, basse résistance à hautes températures, moins efficace en espaces peu grands.
Amorphous silicon (a-Si)	13.4%	8-10%	Capable d'opérer sous températures extrêmes	Production en masse simple, apparence homogène, moins impact dans la performance par rapport aux ombres et hautes températures	Utilisés pour applications à petite échelle, plus vite dégradation, moins efficace en espaces peu grands.
Copper Indium Selenide (CIS)	20.4%	10-13%	Relativement peu impact sur la performance.	Plus efficace que les autres Thin-film, très bon rapport prix-efficacité.	
Cadmium Telluride (CdTe)	18.7%	9-11%	Relativement peu d'impact sur la performance.		Le cadmium est un matériel toxique

## Annexe 4 : Estimation de l'énergie solaire produite

Mois	Radiation solaire globale (kWh/m <sup>2</sup> /jour)	Radiation (kWh/m <sup>2</sup> /mois)	Production Mono-Si (kWh/mois)
Janvier	1,36	40,8	39 529
Février	2,15	64,5	62 490
Mars	3,39	101,7	98 531
Avril	4,22	126,6	122 655
Mai	5,15	154,5	149 686
Juin	5,87	176,1	170 613
Juillet	6,17	185,1	179 332
Août	5,28	158,4	153 464
Septembre	3,91	117,3	113 645
Octobre	2,33	69,9	67 722
Novembre	1,44	43,2	41 854
Décembre	1,11	33,3	32 262
<b>Total</b>	<b>3,5</b>	<b>106,0</b>	<b>1 231 784</b>
		Energie Totale (MWh)	<b>1 231,8</b>

## Annexe 5 : Estimation de l'énergie hydraulique produite

Types de turbine	Diamètre	Hauteur	Epaisseur	Profondeur minimale
<b>Hydroquest 40 kW</b>	1.5 m	1.8 m	5.9 m	2.2 m
<b>Hydrovolts Turbine 12 kW</b>	1.8 m	2.4 m	3.96 m	2.4 m
<b>Smart Hydro Turbine 5 kW</b>	1.32 m	1.12 m	1.12 m	1.1 m

Mois	Flux de l'eau (m <sup>3</sup> /s)	Puissance (W) [Turbine Hydroquest (40 kW)]	Puissance (W) [Turbine Hydrovolts 12kW]	Puissance (W) [Turbine Smart Hydro 5kW]
<b>Janvier</b>	142	2 792,3	926,0	349,2
<b>Février</b>	154	3 561,7	1 181,2	445,5
<b>Mars</b>	164	4 301,6	1 426,5	538,0
<b>Avril</b>	191	6 795,1	2 253,5	849,9
<b>Mai</b>	261	17 338,8	5 750,1	2 168,6
<b>Juin</b>	286	22 813,7	7 565,7	2 853,4
<b>Juillet</b>	224	10 960,8	3 634,9	1 370,9
<b>Août</b>	157	3 774,0	1 251,6	472,0
<b>Septembre</b>	135	2 399,4	795,7	300,1
<b>Octobre</b>	135	2 399,4	795,7	300,1
<b>Novembre</b>	146	3 035,0	1 006,5	379,6
<b>Décembre</b>	148	3 161,4	1 048,4	395,4
<b>Total</b>	178,6	83 333,2	27 635,8	694,7

## Annexe 6 : Estimation de l'énergie éolienne produite

Mois	Vélocité du vent à 20 m d' hauteur (m/s)	Puissance [W] Aeolos-H 10kW	Energie (kWh/mois)
Janvier	2,99	267	195
Février	3,25	343	251
Mars	2,61	178	130
Avril	2,59	174	127
Mai	2,93	252	184
Juin	2,54	164	120
Juillet	2,37	133	97
Août	2,36	131	96
Septembre	2,58	172	125
Octobre	2,34	128	94
Novembre	2,97	262	191
Décembre	3,05	284	207
<b>Total</b>			<b>1 817</b>



## Annexe 7 : Résumé des scénarios

Scénario	Components	Energie produite (GWh/ année)	Energie consommée (GWh/ année)	H2 produit (kg/jour)	H2 consommé (kg/jour)
1	*Ligne de bus C1 *Silyzer 1,25 MW *Tank d'H <sub>2</sub> 500 kg	1,6	12,7	500	483
2	*Ligne de bus C1 *Silyzer 1,25 MW *Tank d'H <sub>2</sub> 500 kg *Siestorage 2,84 MWh	1,6	12,7	500	483
3	*2 voitures H <sub>2</sub> distances longues *Silyzer 25 kW *Tank d'H <sub>2</sub> 15 kg	1,6	2,8	10	7,2
4	*2 voitures H <sub>2</sub> distances longues *Silyzer 25 kW *Tank d'H <sub>2</sub> 15kg *Siestorage 200 kWh	1,6	2,8	10	7,2
5	*2 voitures H <sub>2</sub> distances courtes *Silyzer 25 kW *Tank d'H <sub>2</sub> 8 kg	1,6	2,7	2	1,2
6	*2 voitures H <sub>2</sub> distances courtes *Silyzer 25 kW *Tank d'H <sub>2</sub> 8 kg *Siestorage 220 kWh	1,6	2,7	2	1,2
7	*2 voitures H <sub>2</sub> distances courtes *Silyzer 25kW *H <sub>2</sub> tank 8 kg *Fuel-Cell 114,2 MWh/y	1,6	2,9	2	1,2
21	*4 voitures H <sub>2</sub> *4 e-voitures *3 buses for C1 *Silyzer 300 kW *Tank d'H <sub>2</sub> 100 kg *Fuel-Cell 114,2 MWh/y	1,6	5,3	100	92
22	*4 voitures H <sub>2</sub> *4 e-voitures *2 buses for C1 *Silyzer 200 kW *Tank d'H <sub>2</sub> 70 kg *Fuel-Cell 114,2 MWh/y	1,6	4,5	70	56
23	*4 voitures H <sub>2</sub> *4 e-voitures *Silyzer 25 kW *Tank d'H <sub>2</sub> 15 kg *Fuel-Cell 114,2 MWh/y	1,6	2,9	11	8

## Annexe 8 : Réservoir, CO<sub>2</sub> et ROI

Scénario	Taille du réservoir (m <sup>3</sup> )	CO2 produit (tonne /année)	Réduction de l'impact du CO2 (tonne/année)	ROI (années)
<b>1</b>	155	1312	414	
<b>2</b>	155	1312	414	
<b>3</b>	5	354	166	
<b>4</b>	5	354	166	
<b>5</b>	2,5	342	111	
<b>6</b>	2,5	342	111	
<b>7</b>	2,5	356	119	
<b>21</b>	31		60	
<b>22</b>	22			
<b>23</b>	5		50	