

Rapport de fin d'études : Dimensionnement et montage d'un projet partenarial de transport électrique solaire.

- Filière : Stratégie Energie & Climat
- Rédacteur : Maël Chouiter
- Relecture et contrôle qualité : Jérôme Laplanche
- Validation : Gaëlle Gilboire
- Date : 30/09/11
- Version : 1.0
- Diffusion : ARER

ARER – EIE Espaces Informations et Conseils - www.arer.org - arer@arer.org – www.island-news.org

«Promouvoir la maîtrise de l'énergies et l'utilisation rationnelle des énergies renouvelables, et préserver les ressources naturelles locale dans une perspective de développement durable et d'adaptation aux changements climatiques »

Prenez contact avec notre équipe – Tél. 02 62 257 257

ARER - Agence Régionale Energie Réunion - Association loi 1901 à but non lucratif –Organisme de formation agréé

Siège social : 40 avenue de Soweto * BP 226 * 97456 St-Pierre Cedex
Tel : 0262 38 39 38 * Fax : 0262 96 86 91 * n° SIRET : 43928091800020

Membres de Droits 2010 de l'ARER



Membres associés 2010

ARS-OI, BSO, CERBTP, Chambre des métiers et de l'artisanat (CMA), Conservatoire botanique des Mascariens, Energy Ocean Indien, EPSMR, Mairie de Cilaos, Mairie de L'Etang Salé, Mairie de Mamoudzou, Mairie de Sainte-Marie, Mairie de Petite-Ile, Mairie de La Possession, Mairie de Saint-Philippe, Mairie de Trois Bassins, Qualitropic, SEMAC, SIDELEC, Syndicat des Fabricants de Sucre de La Réunion.

Partenaires associés

ADEME, ADEME Mayotte, Compagnie Thermique de Bois Rouge, Compagnie Thermique du Gol, DDTEFP, DRIRE Réunion, Etat, Electricité de Mayotte, ORA, Pareto, Préfecture de La Réunion, Solar Concept, Union Européenne (FSE, FEDER).





*« L'imagination est le meilleur
mode de transport au monde. »*

Roger Fournie

(Ecrivain québécois)



TABLE DES MATIERES

TABLE DES MATIERES	3
REMERCIEMENTS	6
RESUME.....	7
SUMMARY / ABSTRACT.....	7
RESUME TECHNIQUE.....	8
INTRODUCTION GENERALE.....	10
I. CONTEXTE ET CHIFFRES CLES.....	10
I.1 <i>Politique européenne de développement de la filière véhicule électrique</i>	<i>10</i>
I.2 <i>Contexte réunionnais et enjeux.....</i>	<i>11</i>
II. OBJECTIFS ET PERIMETRE DE L'ETUDE	13
II.1 <i>Plan STARTER et véhicules électriques</i>	<i>13</i>
II.2 <i>Présentation du concept de transport solaire</i>	<i>13</i>
II.3 <i>Bras-Panon : une collectivité engagée.....</i>	<i>14</i>
II.4 <i>Cadrage des travaux.....</i>	<i>14</i>
II.5 <i>Diagramme de Gantt</i>	<i>15</i>
II.6 <i>Jalons.....</i>	<i>16</i>
CHAPITRE 1 : CONCEPTION DU SYSTEME	17
I. DECOMPOSITION EN SOUS SYSTEMES.....	17
I.1 <i>Schéma technique de l'installation.....</i>	<i>17</i>
I.2 <i>Sous système photovoltaïque.....</i>	<i>18</i>
I.3 <i>Sous système Batterie tampon</i>	<i>18</i>
I.3.1 <i>Choix technologique.....</i>	<i>18</i>
I.3.2 <i>Recyclage.....</i>	<i>19</i>
I.4 <i>Sous système onduleur</i>	<i>19</i>
I.4.1 <i>Onduleur classique</i>	<i>19</i>
I.4.2 <i>Onduleur chargeur.....</i>	<i>20</i>
I.5 <i>Sous système Véhicule électrique.....</i>	<i>21</i>
I.5.1 <i>Scénario retenu</i>	<i>21</i>
I.5.2 <i>Equivalent thermique.....</i>	<i>22</i>
I.5.3 <i>Une seconde vie pour les batteries ?.....</i>	<i>24</i>
I.6 <i>Sous système borne de recharge.....</i>	<i>24</i>
I.6.1 <i>Les différents types de charge</i>	<i>24</i>
I.6.2 <i>Les différents modes de charge.....</i>	<i>25</i>
I.6.3 <i>Borne de recharge préconisée</i>	<i>25</i>
I.7 <i>Sous système contrôle commande</i>	<i>26</i>
I.8 <i>Sous système monitoring expérimental.....</i>	<i>26</i>
I.8.1 <i>Monitoring Photovoltaïque et stockage</i>	<i>26</i>
I.8.2 <i>Monitoring VE.....</i>	<i>27</i>
II. PHASES DE FONCTIONNEMENT	28
II.1 <i>Recharge de la batterie tampon.....</i>	<i>28</i>
II.2 <i>Injection sur le réseau de l'excédentaire PV.....</i>	<i>28</i>
II.3 <i>Peak Shaving.....</i>	<i>29</i>
II.3.1 <i>Peak Shaving photovoltaïque</i>	<i>30</i>
II.3.2 <i>Peak Shaving batterie tampon</i>	<i>31</i>
II.4 <i>Recharge des véhicules électriques.....</i>	<i>32</i>
II.4.1 <i>Recharge via la batterie tampon</i>	<i>32</i>
II.4.2 <i>Recharge via le réseau</i>	<i>33</i>
II.5 <i>UPS.....</i>	<i>34</i>
CHAPITRE 2 : OUTIL DE DIMENSIONNEMENT	36
I. OBJECTIFS.....	36

II.	POURQUOI MATLAB ?	36
II.1	Avantages et inconvénients	36
II.2	Copyright	37
III.	SELECTION DES DONNEES D'ENTREE	37
III.1	Données kilométriques	37
III.2	Données d'irradiation	38
III.3	Données d'équipements	41
III.3.1	Réseau	41
III.3.2	Photovoltaïque	42
III.3.3	Véhicules électriques	42
III.3.4	Pack batterie	44
III.3.5	Onduleurs	45
III.3.6	Bornes de recharge	46
III.4	Données économiques	46
III.5	Données carbone	49
IV.	CŒUR DU MODELE DE CALCUL	51
IV.1	Le kWh : une grandeur clé	51
IV.2	Blocs d'imbrication	52
IV.3	Définition des variables	53
IV.4	Enregistrement des résultats	53
V.	VISUALISATION DES RESULTATS	54
V.1	Bilan carbone	54
V.1.1	Tank to Wheel	54
V.1.2	Well to tank	55
V.1.3	Well to wheel	56
V.1.4	Energie grise	57
V.2	Bilan économique	58
V.2.1	Chiffres clés	58
V.2.2	Méthode TEC	62
CHAPITRE 3 : LANCEMENT DU PROJET		64
I.	IMPLANTATION	64
II.	ASPECTS JURIDIQUES	65
II.1	Autoconsommation ?	65
II.2	Tarifs de rachat ?	65
II.2.1	Electrons photovoltaïques	65
II.2.2	Electrons électrochimiques	66
II.2.3	Déconnexion ?	66
III.	SUBVENTIONS	67
III.1	Appel à manifestation d'intérêt de l'ADEME	67
III.2	Appel à projet de la Région	67
IV.	CDC, DCE & AO	67
CONCLUSION GENERALE		69
I.	SUJET DE THESE PROFESSIONNEL	69
II.	REGARD CRITIQUE	69
TABLE DES ILLUSTRATIONS		71
ANNUAIRE DES ACTEURS		73
REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES		74
NOMENCLATURE DES SIGNES / GLOSSAIRE		76
ANNEXES		77
ANNEXE A : PLAN DE MASSE DU CHAMP DE FOIRE		78
ANNEXE B : TECHNOLOGIE VANADIUM		79
Annexe B.1 : Avantages et inconvénients		79
Annexe B.2 : Schéma technique de l'installation		79



ANNEXE C : LES TARIFS D'ACHAT PHOTOVOLTAÏQUES.....	80
<i>Annexe C.1 : Critères d'éligibilité avant le 1^{er} janvier 2012</i>	80
<i>Annexe C.2 : Tarifs de rachat</i>	81
ANNEXE D : SCENARI DE FLOTTE ELECTRIQUE.....	82
<i>Annexe D.1 : Scenario ECO</i>	82
<i>Annexe D.2 : Scenario PREMIUM</i>	82
ANNEXE E : VUES 3D DE L'ENSEMBLE DE L'INSTALLATION	83
ANNEXE F : DOCUMENTATION TECHNIQUE BORNE DE RECHARGE BBR.....	84
ANNEXE G : FICHE TECHNIQUE BATTERIES HOPPECKE.....	86
ANNEXE H : FILIERE DE RECYCLAGE DES ACCUMULATEURS AU PLOMB A LA REUNION.....	88
ANNEXE I : FICHES STATISTIQUES DES VEHICULES THERMIQUES	90
<i>Annexe I.1 : Fiche Citroën C3 n°332 BRX</i>	90
<i>Annexe I.2 : Fiche Renault Kangoo n° 967 BGL</i>	90
<i>Annexe I.3 : Fiche Nissan Kubistar AC 065 LR</i>	91
<i>Annexe I.4 : Fiche Scooters Zenith</i>	91
ANNEXE J : PRESENTATION DE L'ARER	92
ANNEXE K : PROJET VERT	94
ANNEXE L : CŒUR DU MODELE DE CALCUL MATLAB.....	95

REMERCIEMENTS

Pour commencer, je tiens à remercier Matthias VINARD, ex-chargé de projet stockage à l'ARER, qui m'a recruté pour ce stage, et qui a été mon tuteur le temps de quelques semaines. Je lui souhaite un épanouissement complet dans son nouveau travail.

Je remercie Laurent GAUTRET, ex-directeur technique de l'ARER, qui a su reprendre mon tutorat avec brio suite au départ de Matthias. Sa façon de manager et son esprit critique sont une invitation à remettre sans cesse en question nos acquis. Je lui souhaite également un épanouissement dans la nouvelle voie qu'il a décidé de suivre.

Je remercie Jérôme LAPLANCHE, référent du secteur Nord/Est à l'ARER, qui a su mener à bien mon stage suite au départ de Laurent. Sa bonne humeur et son naturel avenant font de lui un collègue de travail idéal.

Je remercie Frédéric LEGENDRE, directeur des services techniques de la mairie de Bras-Panon, qui a apporté un regard extérieur tout au long de ce projet. Son expérience et son œil critique ont permis d'orienter et de raisonner nos choix d'engineering sur le projet.

Je remercie également toutes les personnes de l'agence Nord pour leur disponibilité et pour nos nombreux échanges enrichissants autour des énergies renouvelables.

Je remercie aussi tous ceux dont le nom n'apparaît pas mais qui savent combien je suis reconnaissant.

Au-delà d'un simple « je remercie », j'exprime ici toute ma gratitude pour ce stage qui s'est terminé si vite.

RESUME

L'accession à l'**autonomie énergétique** de l'île de La Réunion à l'**horizon 2025-2030**, objectif politique et social clairement affiché depuis une décennie, impose une nécessaire remise en question du système mis en place depuis plusieurs dizaines d'années dans deux secteurs : la production d'électricité et les transports. Dans le cadre de ses réflexions sur ces actions stratégiques, le Conseil Régional de La Réunion propose un plan de redressement qui vise les 100% de transports propres en 2030 avec au moins **50% de transports électriques** à cet horizon. Le potentiel de développement de cette filière de véhicules électriques est donc considéré comme immense à La Réunion. Néanmoins, l'électricité réunionnaise étant très fortement carbonée, le bilan carbone des véhicules électriques est comparable à celui des véhicules thermiques neufs de classe A. Il apparaît donc que **le véhicule électrique dans sa forme classique à La Réunion est un non sens**, non sens d'ailleurs mis en exergue par les autres acteurs de l'énergie à la réunion. La solution alternative présentée dans ce rapport a pour but de démontrer que l'usage de véhicules électriques à travers des **infrastructures de recharges adaptées** à la Réunion n'est pas une aberration écologique.

SUMMARY / ABSTRACT

In order to bring the **energy self-sufficiency** for the island La Réunion in about **30 years** (political and social goal adopted since ten years), we must change the system of electricity production and also our way of transport. That's why the Conseil Régional de La Réunion adopted a strategy which the main goal is to reach 100% of clean transports (**50% of electric transport**) for 2030. Therefore, electric transports potential increasing and huge possibilities grow up in La Réunion. Nevertheless, Réunion's electricity contain much carbon, thus the carbon footprint of electric vehicle is equal to the carbon footprint of combustion vehicle class A. It seems that **the electric vehicle is nonsensical for this island**; in addition this nonsense is denounced by some of energy actors in La Réunion. The main goal of this report is to prove that electric vehicle combined with **appropriate facilities** for the Réunion are not an ecological aberration.

RESUME TECHNIQUE

Le retour à l'autonomie énergétique de l'île de La Réunion à l'horizon 2025-2030, objectif politique et social clairement affiché depuis une décennie, impose une nécessaire remise en question du système mis en place depuis plusieurs dizaines d'années dans deux secteurs : la production d'électricité et les transports.

Dans le cadre de ses réflexions sur ces actions stratégiques, le Conseil Régional de La Réunion aidé par le PRERURE (Plan Régional des Energies Renouvelables et d'Utilisation Rationnelle de l'Energie) a adopté en 2009 le plan STARTER (Stratégie d'Autosuffisance énergétique pour la Relance et la Transition de l'Economie Réunionnaise) donnant des éléments structurants sur l'évolution de nos systèmes de production électrique et de transports. Ce plan STARTER met en évidence les différences notables entre une stratégie de développement tendanciel et une stratégie volontariste dans laquelle l'accent serait mis de manière forte sur un développement énergétique durable de notre île.

Au-delà du gain énergétique considérable, le plan STARTER propose des solutions technologiques innovantes dans le domaine des transports. Ainsi, ce scénario se base sur une hypothèse de 100% de transports propres en 2030 avec au moins 50% de transport électrique à cet horizon (soit ~ 300000 véhicules électriques particuliers). Le potentiel de développement de cette filière de véhicules électriques est donc considéré comme immense à La Réunion.

Le véhicule électrique est dit propre car il n'émet aucun GES lors de sa circulation. Néanmoins ce concept doit être affiné et notamment pris en compte dans une analyse de type puits à la roue (Well to Wheel). En effet, le véhicule électrique nécessite de l'électricité pour rouler et doit donc, à l'instar d'un véhicule avec moteur à combustion, recharger son réservoir électrique périodiquement. Pour ce faire, le véhicule électrique doit être connecté au réseau électrique. Ce réseau électrique utilise plusieurs moyens de production (nucléaire, charbon, gaz, hydraulique, solaire, diesel, etc.) pour générer de l'électricité et en conséquence l'utilisation d'un kWh sur ce réseau électrique génère des émissions de GES, selon le mix énergétique du réseau.

Or, l'électricité réunionnaise est très fortement carbonée par rapport à l'électricité métropolitaine : 815 g CO₂/kWh contre 91 g en métropole en 2008. Devant cet état de fait, on comprend aisément que le même véhicule électrique selon qu'il soit utilisé à La Réunion ou en métropole émettra plus ou moins de GES (en fait presque 10 fois plus à La Réunion).

En prenant des chiffres de consommation de véhicule électrique trouvés dans la littérature, on s'aperçoit qu'un véhicule électrique de ce type à La Réunion émettrait en fin de compte pas loin de 123 g CO₂/km (contre 14 g en métropole). Bien que ce chiffre soit dans les faits meilleur que la moyenne réunionnaise, et meilleur que la moyenne des nouvelles immatriculations, il ne respecte pas les objectifs de l'Union Européenne à l'horizon 2012 et encore moins ceux de 2020.

De plus, le cas réunionnais est atypique. En effet, dans une utilisation usuelle d'un véhicule électrique, la recharge devrait s'effectuer le soir par l'utilisateur à son domicile. Or cette recharge occurrerait lors de la pointe de consommation du soir (de 19h à 22h) : d'une part elle mettrait à mal le déjà fragile équilibre du réseau réunionnais à cette heure et d'autre part elle favoriserait le développement de sources carbonées. Il apparaît donc que le véhicule électrique dans sa forme classique à La Réunion est un non sens, non sens d'ailleurs mis en exergue par les autres acteurs de l'énergie à la réunion.

Dès lors, en conjuguant ces deux faits : l'instabilité du réseau électrique réunionnais et la nécessité de penser à une fourniture d'électricité propre pour les véhicules électriques à La Réunion, on comprend

bien qu'il existe un enjeu majeur à La Réunion pour créer une filière de véhicules électriques « photovoltaïques ».

Devant ce constat, la Région souhaite développer sur son territoire des stations de recharge solaire dans le but de porter le développement des véhicules électriques rechargeables (VER) à La Réunion tout en tenant compte des spécificités du réseau électrique réunionnais. Pour ce faire, l'ARER a lancé début 2011 une campagne de sensibilisation auprès des collectivités sur ce concept de station de recharge solaire. Ce concept, par ailleurs déjà éprouvé en métropole, propose de subvenir aux besoins électriques du VER grâce à l'énergie solaire et plus particulièrement à l'énergie photovoltaïque, on parle alors de "transport solaire". La particularité de ce système de recharge est qu'il se compose entre autres d'un système de stockage de l'énergie, ce système de stockage va permettre de décorrélérer dans le temps l'ensoleillement et la recharge des VER. En effet, dans les collectivités les véhicules sont pour la plupart utilisés en journée, les besoins de recharge surviendront donc en soirée après 18h, heure à laquelle la production photovoltaïque s'effondre avec la baisse de l'ensoleillement.

Conscient de l'enjeu que représentent les transports propres dans les années à venir, la Mairie de Bras-Panon a démontré un intérêt tout particulier pour cette thématique lors de la présentation par l'ARER du concept de Transport Solaire pour Tous : c'est dans ce contexte que l'ARER a été mandaté par la commune de Bras-Panon pour mener à bien l'étude de faisabilité d'un tel projet. A l'issue de cette étude il a été démontré que la rentabilité d'un projet pilote de transport solaire par rapport à une solution de transport fossile classique est atteinte à la condition sinequanone que des subventions externes viennent en complément des investissements des collectivités.

C'est dans cette optique de subventionnement de projets pilotes que la Région Réunion a proposé le lancement d'un appel à projet concernant le transport solaire à compter de début septembre 2011. Cet appel à projet vise à subventionner 2 ou 3 projets pilotes accueillis par des collectivités pour une enveloppe globale de 250 000 €.

INTRODUCTION GENERALE

I. CONTEXTE ET CHIFFRES CLES

I.1 Politique européenne de développement de la filière véhicule électrique

Les transports représentent une pierre angulaire de la stratégie énergétique de l'Union Européenne. La fameuse cible des trois fois 20% en 2020 (20% d'électricité d'origine renouvelable, 20% de transports propres et augmentation de l'efficacité énergétique de 20%) en est une illustration parfaite.

En 2001, l'adoption du Livre Blanc était une première étape afin de doter les membres de l'Union Européenne d'outils et de technologies permettant de diminuer la facture énergétique du domaine des transports. Parmi les différentes mesures adoptées, on peut notamment citer le rééquilibrage entre les différents modes de transports, la réflexion sur les flux de transports et le recentrage sur l'utilisateur comme cible majeure de cette politique.

L'évaluation en 2009 de ce Livre Blanc a permis de mettre en évidence plusieurs tendances :

- ✓ En 2006 (derniers chiffres disponibles), le secteur des transports est responsable d'un quart des émissions de GES de l'Union Européenne,
- ✓ Aucun autre secteur (Industrie, Services, Habitations, etc.) n'a connu une telle inflation depuis 1990,
- ✓ La tendance est clairement à la hausse contrairement aux autres secteurs (+26% entre 1990 et 2006).

C'est grâce entre autres à ces constats que l'Union Européenne a adopté plusieurs mesures destinées à développer le marché des véhicules propres sur son territoire :

- ✓ L'étiquetage des véhicules neufs en termes d'émissions de CO₂ (g CO₂/km),
- ✓ Une Directive Européenne obligeant chaque Etat Membre à introduire a minima 10% de biodiesel et de biocarburants dans son parc automobile d'ici à 2020,
- ✓ La mise en place d'un Partenariat Public Privé (PPP) « European Green Cars Initiative » en 2008 pour supporter des efforts de R&D sur les technologies propres. Ce PPP est doté de fonds importants (1 milliard d'euros dans le cadre du 7^{ème} PCRD et 4 milliards d'euros sous forme de crédits consentis par la Banque Européenne D'investissement),
- ✓ Une stratégie de réduction des émissions de GES par les voitures neuves avec un objectif initial de 120 g CO₂/km en 2005,

Néanmoins, sur ce dernier objectif, plutôt que d'imposer des normes d'émissions contraignantes aux constructeurs, l'Union Européenne a choisi la voie des engagements volontaires. Ainsi, sur la base de ces accords avec les industriels, l'objectif était révisé à la hausse avec un taux moyen cible de 140 g CO₂/km en 2009 pour les nouveaux véhicules mis sur le marché. Néanmoins, comme le montre le tableau ci-dessous, les objectifs sont loin d'être atteints.

	ACEA	JAMA	KAMA	Total
2004	161	170	168	162
2005	160	166	167	161
2006	160	161	164	160
2007	157	159	161	158

D'après T&E (European Federation for Transport and Environment), août 2008

Tableau 1 : Emissions moyennes des voitures neuves mises sur le marché européen (en gCO₂/km)

Prenant acte de l'échec de ces accords volontaristes, l'Union Européenne a adopté en 2008 un nouveau règlement visant à abaisser le niveau moyen d'émissions des véhicules neufs mis sur le marché à 130/120 g CO₂/km d'ici 2012 (130g étant une obligation pour le constructeur et sa motorisation et 120 g pouvant être atteints grâce à d'autres leviers d'actions comme la climatisation, le chauffage, les pneus, les changements de vitesses, etc.) puis à 95 g CO₂/km en 2020.

Et les véhicules électriques dans tout cela ? A ce jour, il n'existe aucun objectif clairement affiché par l'Union Européenne sur ce secteur précis. Il faut se tourner vers certains Etats Membres pour obtenir des objectifs chiffrés en termes de véhicules électriques :

- ✓ La France a établi un objectif de 2 millions de véhicules électriques sur son territoire en 2020,
- ✓ L'Allemagne a fixé un objectif d'un million de véhicules électriques en 2020,
- ✓ L'Espagne espère atteindre le chiffre de 250000 véhicules électriques en 2014.

Sous l'impulsion de ces pays et également de l'Italie et des Pays-Bas, il est espéré une prise de position claire de la part de l'Union Européenne dans les mois à venir. Si cette décision est prise rapidement, on peut espérer le chiffre de 10% du parc automobile européen d'ici à 2020 (soit 20 millions de véhicules électriques en 2020 sur l'ensemble du territoire européen).

A l'heure actuelle, la France est le seul pays européen avec le Portugal à satisfaire l'objectif européen en termes d'émissions de GES pour les véhicules neufs. Ainsi, en 2008, 63% des ventes de véhicules neufs en France le sont avec des véhicules émettant moins de 140 g CO₂/km. De même les constructeurs français sont sur une bonne dynamique puisque PSA est le seul constructeur européen à atteindre cet objectif quand Renault n'en est plus très loin avec 144 g CO₂/km en moyenne sur ses nouveaux modèles vendus.

I.2 Contexte réunionnais et enjeux

Le véhicule électrique est dit propre car il n'émet aucun GES lors de sa circulation. Néanmoins ce concept doit être affiné et notamment pris en compte dans une analyse de type puits à la roue. En effet, le véhicule électrique nécessite de l'électricité pour rouler et doit donc, à l'instar d'un véhicule avec moteur à combustion, recharger son réservoir électrique périodiquement. Pour ce faire, le véhicule électrique doit être connecté au réseau électrique. Ce réseau électrique utilise plusieurs moyens de production (nucléaire, charbon, gaz, hydraulique, solaire, diesel, etc.) pour générer de l'électricité et en conséquence l'utilisation d'un kWh sur ce réseau électrique génère des émissions de GES, selon le mix énergétique du réseau.

Or, l'électricité réunionnaise est très fortement charbonnée par rapport à l'électricité métropolitaine (815 g CO₂/kWh contre 91 g en métropole en 2008). Devant cet état de fait, on comprend aisément que le même véhicule électrique selon qu'il soit utilisé à La Réunion ou en métropole émettra plus ou moins de GES (en fait presque 10 fois plus à La Réunion).

En prenant des chiffres de consommation de véhicule électrique trouvés dans la littérature (0.15 kWh/km), on s'aperçoit qu'un véhicule électrique de ce type à La Réunion émettrait en fin de compte pas loin de 123 g CO₂/km (contre 14 g en métropole). Bien que ce chiffre soit dans les faits meilleur que la moyenne réunionnaise, et meilleur que la moyenne des nouvelles immatriculations, il ne respecte pas les objectifs de l'Union Européenne à l'horizon 2012 et encore moins ceux de 2020 (en tenant compte des nouvelles sources charbonnées de production électrique prévues à La Réunion comme la nouvelle centrale du Port).

De plus, le cas réunionnais est atypique. En effet, dans une utilisation usuelle d'un véhicule électrique, la recharge devrait s'effectuer le soir par l'utilisateur à son domicile. Or cette recharge occurrerait lors de la pointe de consommation du soir (de 19h à 22h) et d'une part elle mettrait à mal le déjà fragile équilibre du réseau réunionnais à cette heure et d'autre part elle favoriserait le développement de sources charbonnées (les ENR usuelles n'ayant pas cette capacité de production en soirée).

Devant ce constat, il apparaît que le véhicule électrique dans sa forme classique à La Réunion est un non sens, non sens d'ailleurs mis en exergue par l'ADEME et EDF.

En parallèle, le concept de Solaire pour Tous porté par l'ARER (présentation de l'entreprise en Annexe J) a émergé depuis 2 années. Ce concept se propose à travers des montages financiers participatifs (collectivités, Conseil Général, Conseil Régional) de permettre l'accès aux technologies solaires (eau chaude solaire pour l'instant mais bientôt électricité solaire) à tous les ménages réunionnais et ce quelles que soient leurs ressources. Avec une dizaine de villages solaires sur toute l'île, ce concept est une vraie réussite et permet d'atteindre plusieurs objectifs : l'appropriation de ces technologies innovantes par tous, le déploiement de technologies propres à grande échelle permettant d'œuvrer aux objectifs énergétiques de l'île, l'assimilation par la population de ces objectifs de développement durable ou encore le soutien aux filières locales.

Ce dernier point est d'ailleurs des plus intéressants à l'heure où la filière photovoltaïque réunionnaise traverse une crise grave : baisse du crédit d'impôt pour les particuliers (de 50% à 25%), baisse des tarifs de rachat, suppression de la défiscalisation (un des leviers de ce secteur à La Réunion) et aussi et surtout atteinte de la limite de 30% d'ENR intermittente sur le réseau électrique réunionnais en 2012.

Dès lors, en conjuguant ces trois faits : le photovoltaïque réunionnais en danger, la validation sur le terrain du concept de Solaire pour Tous et la nécessité de penser à une fourniture d'électricité propre pour les véhicules électriques à La Réunion, on comprend bien qu'il existe un enjeu majeur à La Réunion pour créer une filière de véhicules électriques « photovoltaïques ».

II. OBJECTIFS ET PERIMETRE DE L'ETUDE

II.1 Plan STARTER et véhicules électriques

Le retour à l'autonomie énergétique de l'île de La Réunion à l'horizon 2030, objectif politique et social clairement affiché depuis une décennie, impose une nécessaire remise en question du système mis en place depuis plusieurs dizaines d'années dans deux secteurs : la production d'électricité et les transports.

Dans le cadre de ses réflexions sur ces actions stratégiques, le Conseil Régional de La Réunion aidé par le PRERURE (Plan Régional des Energies Renouvelables et d'Utilisation Rationnelle de l'Energie) a adopté en 2009 le plan STARTER (STRatégie d'Autosuffisance énergétique pour la Relance et la Transition de l'Economie Réunionnaise) donnant des éléments structurants sur l'évolution de nos systèmes de production électrique et de transports. L'outil « PETREL – île de la Réunion » (Plan Economique de Transition et de Relance par les Energies 100% Locales) développé par l'ARER sert de base technique à ce plan et permet de bâtir et d'illustrer très concrètement la faisabilité du plan STARTER.

Ce plan STARTER met en évidence les différences notables entre une stratégie de développement tendanciel (i.e. le développement énergétique réunionnais suit les évolutions récentes) et une stratégie volontariste dans laquelle l'accent est mis de manière forte sur un développement énergétique durable de notre île. En ce qui concerne le secteur des transports, on peut notamment citer les chiffres suivants :

- ✓ Scénario tendanciel : 631500 véhicules particuliers pour un total d'environ 800000 véhicules routiers en 2030,
- ✓ Scénario volontariste : 500000 véhicules particuliers pour un total d'environ 665000 véhicules routiers en 2030.

Au-delà du gain énergétique (40% de consommation énergétique en moins pour le scénario volontariste par rapport au scénario tendanciel) considérable, le plan STARTER propose des solutions technologiques innovantes dans le domaine des transports. Ainsi, ce scénario se base sur une hypothèse de 100% de transports propres en 2030 avec au moins 50% de transport électrique à cet horizon (soit ~ 300000 véhicules électriques particuliers). Le potentiel de développement de cette filière de véhicules électriques est donc considéré comme immense à La Réunion.

II.2 Présentation du concept de transport solaire

Devant ce constat, la région souhaite développer sur son territoire des stations de recharge solaire dans le but de porter le développement des véhicules électriques rechargeables (VER) à La Réunion tout en tenant compte des spécificités du réseau électrique réunionnais. Pour ce faire, ce concept de station de recharge solaire propose de subvenir aux besoins électriques du VER grâce à l'énergie solaire et plus particulièrement à l'énergie photovoltaïque, on parle alors de "transport solaire". La particularité de ce système de recharge est qu'il se compose entre autres d'un système de stockage de l'énergie, ce système de stockage va permettre de dé-corréler dans le temps l'ensoleillement et la recharge des VER. En effet en ce qui concerne les collectivités, les véhicules sont pour la plupart utilisés en journée, les besoins de recharge surviendront donc en soirée après 18h, heure à laquelle la production photovoltaïque s'effondre avec la baisse de l'ensoleillement. En l'absence de ce système de stockage "tampon", la recharge par photovoltaïque n'a plus aucun sens, en effet une recharge des VER à partir du réseau aura pour effet de mettre à mal le déjà fragile équilibre du réseau réunionnais à

cette heure et d'autre part elle favoriserait le développement de sources charbonnées (démarrage des groupes électrogènes par EDF en période de pointe).

II.3 Bras-Panon : une collectivité engagée

Bras-Panon, petite ville au charme créole située à l'est de l'île, est l'une des 8 communes membres de droit de l'ARER (en 2011, 19 Membres de Droit et 16 Membres Associés). Conscient de l'enjeu que représentent les transports propres dans les années à venir, Mr le Maire de Bras-Panon a démontré un intérêt tout particulier lors de l'évocation par l'ARER d'un projet pilote de transport solaire sur l'île. C'est dans ce contexte que l'ARER a été mandaté par la commune de Bras-Panon pour recruter un élève ingénieur en dernière année d'étude afin de lui confier l'étude de faisabilité d'un tel projet.

II.4 Cadrage des travaux

D'un point de vue générale, le planning des tâches élaboré en début de mission a été respecté modulo quelques aléas due principalement aux multiples périodes de congés des uns et des autres en cette période de l'année. Le diagramme de Gantt ci-dessous expose la répartition et le séquençage des différentes tâches ainsi que leur durée respective.

II.5 Diagramme de Gantt

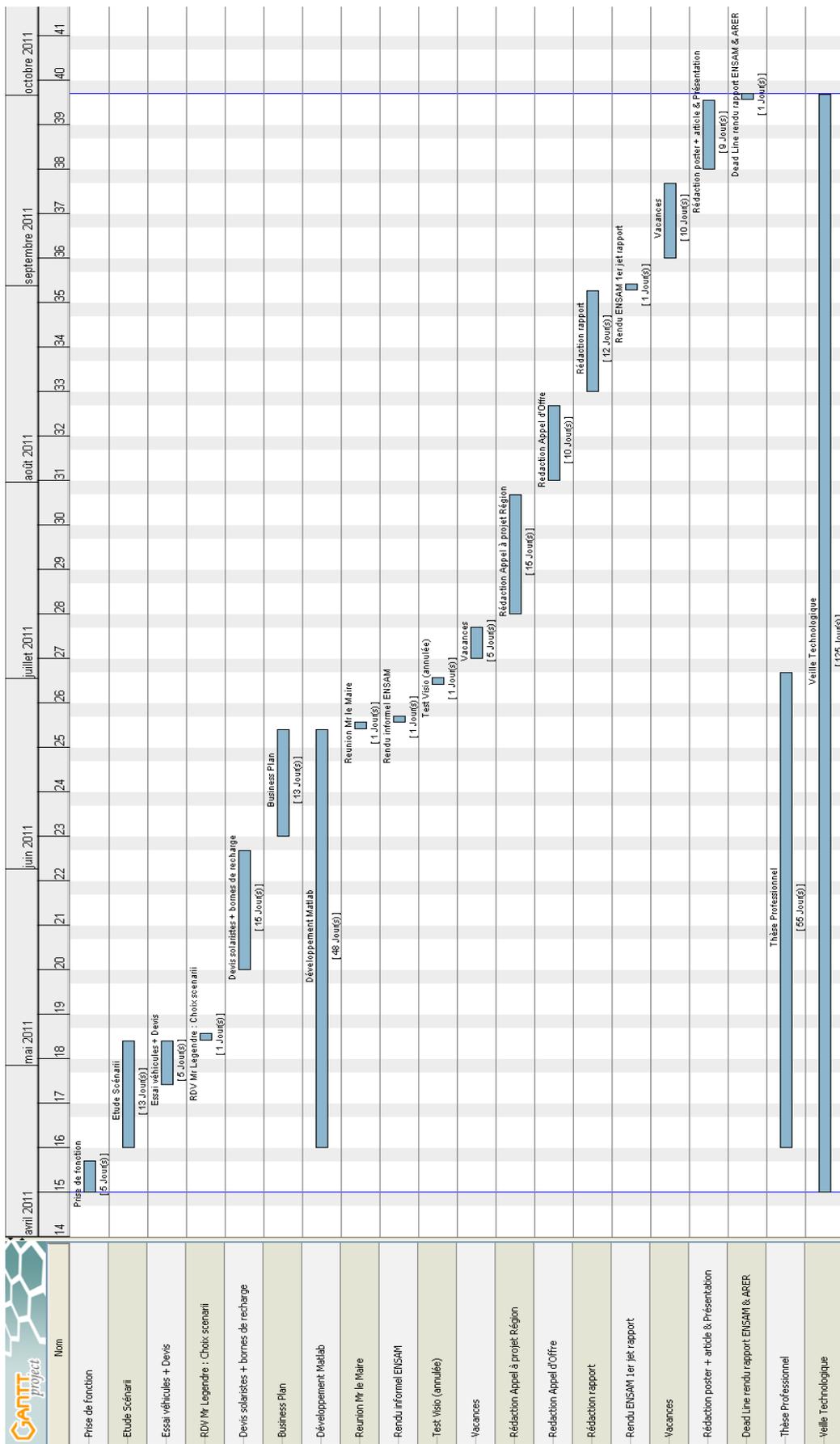


Figure 1 : Diagramme de Gantt du projet



II.6 Jalons

Dans un souci de lisibilité, tous les jalons n'ont pas pu être représentés dans la figure Figure 1 ci-dessus. Les jalons qui ont joués un rôle crucial dans la réalisation de ce projet ont été les suivants :

- ✓ Réunion du 05/05/11 : Sélection deux scénarii de flotte électrique à présenter à Mr le Maire de Bras-Panon parmi les 6 proposés.
- ✓ Réunion du 25/05/11 : Choix de la technologie de stockage pour le système de batterie tampon.
- ✓ Réunion du 23/06/11 : Sélection du scénario final de flotte électrique par Mr le Maire. Aval de Mr le Maire pour lancer le projet sur le budget de 2011 si toutefois celui-ci est financé à hauteur de 50% par le conseil régional.
- ✓ Réunion du 30/06/11 : Décision de la Région de procéder par Appel à projet pour l'attribution des financements.

CHAPITRE 1 : CONCEPTION DU SYSTEME

I. DECOMPOSITION EN SOUS SYSTEMES

Afin de présenter le plus clairement possible le système de station de recharge solaire, celui-ci est décomposé en plusieurs sous systèmes. Néanmoins il est important d'avoir à l'esprit que pour assurer le bon fonctionnement de l'installation ces sous systèmes ne sont pas dimensionnés de manière individuelle. En effet le dimensionnement que nous aborderons au chapitre suivant se fait en tenant compte de tous les caractéristiques des sous systèmes, dès lors il apparait clairement que la compatibilité des systèmes entre eux sera un facteur décisif dans le choix du matériel.

I.1 Schéma technique de l'installation

Avant de détailler les sous systèmes de l'installation, il semble primordial d'aborder le système dans sa globalité afin de bien saisir la finalité du projet une fois les sous systèmes assemblés entre eux. La Figure 2 ci-dessous représente de façon schématique le système complet :

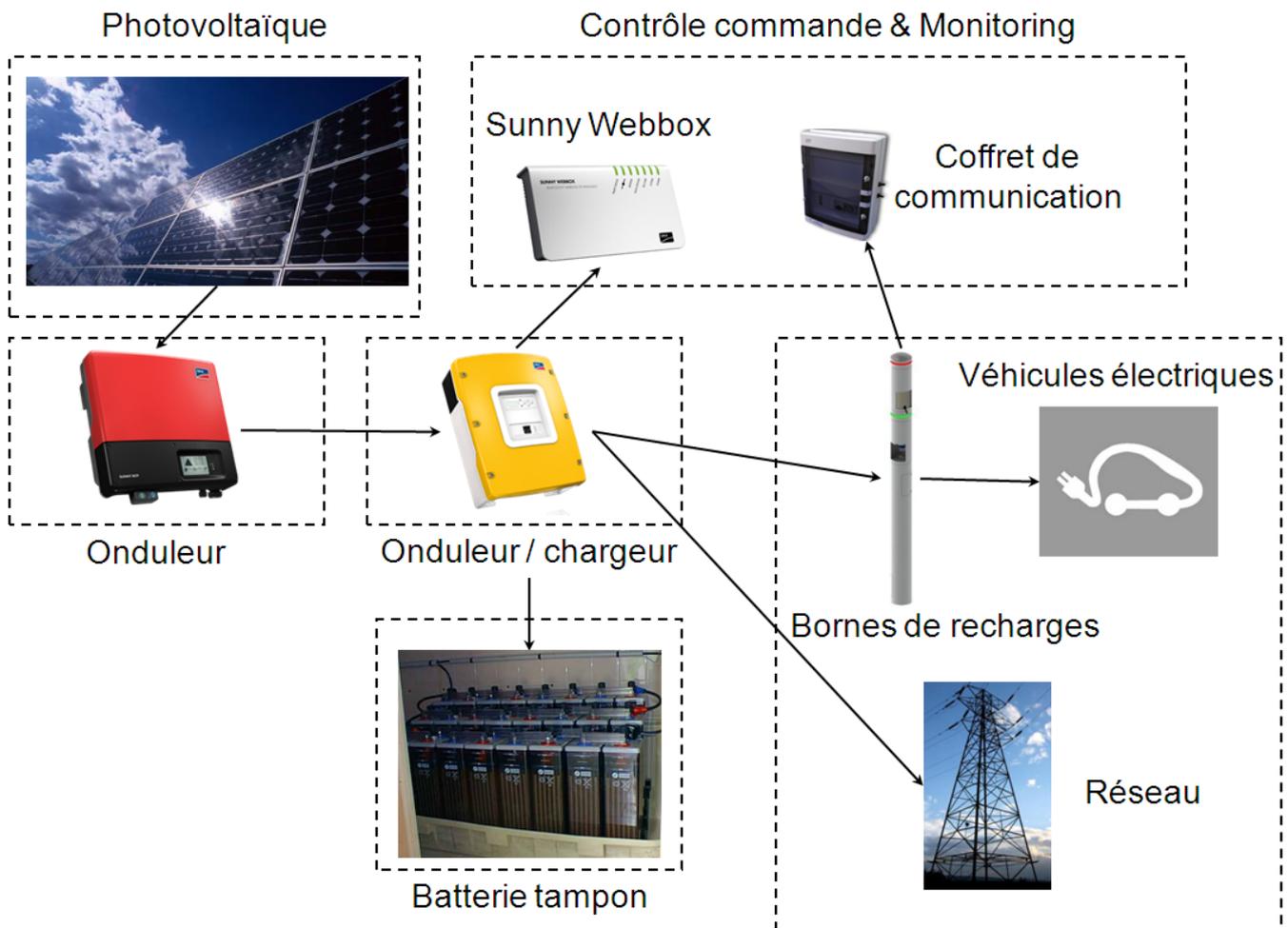


Figure 2 : Schéma technique de l'installation

I.2 Sous système photovoltaïque

L'installation photovoltaïque est tout ce qu'il y a de plus classique, elle doit néanmoins respecter les normes cycloniques en vigueur ici à la Réunion. Idéalement à la Réunion l'orientation des panneaux doit être Nord à Nord Est et l'inclinaison d'une vingtaine de degrés. La technologie prédominante sur l'île est le poly cristallin et le mode d'intégration le plus répandu est l'intégration simplifiée au bâti.

I.3 Sous système Batterie tampon

I.3.1 Choix technologique

A l'issu d'un benchmarking sur les technologies de stockage, la technologie Plomb tubulaire ouvert a été retenue. En voici les différents avantages et inconvénients :

Avantages :

- ✓ Disponibilité chez les solaristes de l'île
- ✓ Faible coût
- ✓ Maturité technologique
- ✓ Chaîne de recyclage bien maîtrisée
- ✓ Peu de maintenance

Inconvénients :

- ✓ Profondeur de décharge max = 40%
- ✓ Faible durée de vie (de l'ordre de 10 ans)
- ✓ Perte de capacité irréversible en cas de cyclage profond

Le principal avantage de la technologie Plomb tubulaire ouvert restant son faible coût, environ 9 fois moins cher que la technologie Vanadium présentée en Annexe B. Ce type de batterie à été conçu à la base pour fonctionner en couplage avec les panneaux photovoltaïques dans les installations en systèmes isolés. La configuration de l'île de la Réunion et de ses différents cirques en particulier celui de Mafate a imposé le recours aux systèmes isolés depuis les années 1980 pour un très grand nombre de foyers. C'est dire si le retour d'expérience est significatif ici plus qu'ailleurs, les compétences développées en interne par les solaristes de l'île sur cette technologie représente un avantage indéniable pour le choix de cette technologie dans notre projet. A titre indicatif nous avons préconisé l'emploi des batteries de la marque allemande Hoppecke, la gamme OPzS présentée en Annexe G est tout indiquée pour notre utilisation.



Figure 3 : Batteries de la gamme OPzS de chez Hoppecke



Ce sont des éléments de 2 Volts chacun de capacité variable, leur dimensionnement sera abordé au chapitre 2.

I.3.2 Recyclage

Le recyclage des batteries est lié à une réglementation : la Directive Européenne n°2006/66 et son décret d'application français n°2009-1139. Cette directive s'applique à tous les types de piles et accumulateurs et encourage un niveau élevé de collecte et de recyclage des déchets de piles et accumulateurs ainsi qu'une amélioration de la performance environnementale de tous les acteurs (producteurs, distributeurs et utilisateurs finaux), en particulier ceux qui participent directement aux activités de traitement et de recyclage des déchets. Aussi, cette directive distingue les batteries par « types d'utilisation » et non par technologies (plomb, lithium, ...). La « stratégie européenne pour des véhicules propres et économes en énergie », publiée le 26 avril 2010 par la Commission européenne, souhaite quant à elle « encourager des programmes de recherche européens sur le recyclage et la réutilisation des batteries ». Les adeptes de l'analyse de cycle de vie en conviendront, la filière de recyclage des batteries possède des bases solides et plus particulièrement pour le recyclage des batteries au Plomb qui sont présentes dans tous nos véhicules thermiques depuis un peu plus d'un demi-siècle. Néanmoins soulignons que le cas de la Réunion est spécifique puisque les batteries sont envoyés en métropole afin d'être recyclés (Cf. Annexe H). C'est l'Association de Traitements des Batteries de la Réunion (ATBR) qui est en charge de cette filière de recyclage.

I.4 Sous système onduleur

Comme indiqué sur la Figure 2 ce sous système se compose de deux principaux éléments, les onduleurs classiques et les onduleurs chargeurs. Par ailleurs, dans un souci de compatibilité entre ces deux éléments il est préférable d'opter pour un même et unique constructeur.

I.4.1 Onduleur classique

La fonction principale de l'onduleur classique est de convertir avec le meilleur rendement qui soit le courant continu issu des panneaux photovoltaïques en courant alternatif destiné à être injecté sur le réseau. Ces onduleurs se retrouvent donc dans toutes les installations photovoltaïques classiques. Leur nombre est fonction de la puissance photovoltaïque installée. Pour notre étude nous avons retenu la gamme d'onduleur Sunny Boy de chez SMA qui est le leader mondiale des onduleurs. Au sein de cette gamme il existe plusieurs onduleurs ayant les mêmes fonctionnalités et rendements mais qui diffèrent de part la puissance qu'ils sont capables de convertir. Sans entrer dans les détails de dimensionnement que nous verrons au chapitre suivant, l'onduleur Sunny Boy ayant pour référence 5000 TL (Figure 4) semble tout indiqué pour notre installation.



Figure 4 : Onduleur SMA Sunny Boy 5000 TL

I.4.2 Onduleur chargeur

Les onduleurs chargeurs quant à eux sont utilisés dans les applications de systèmes isolés (off grid), ils permettent de faire l'interface entre les panneaux photovoltaïques et le système de stockage. Ils sont capables de gérer la charge du parc batteries et d'éviter les surcharges ou les décharges trop profondes. Dans notre cas d'utilisation ces onduleurs/chargeurs va venir en complément des onduleurs classiques afin de permettre l'adjonction de notre système de stockage tampon (Cf. Figure 2). Ils reçoivent du courant alternatif issu des onduleurs classiques qu'ils vont ensuite transformer en courant continu afin de recharger les batteries. Lors de la décharge des batteries, l'onduleur/chargeur va retransformer ce courant continu en courant alternatif tout en ajustant le voltage ainsi que la fréquence afin de pouvoir injecter ce courant dans les meilleures conditions au réseau. Pour notre étude nous avons retenu la gamme Sunny Island de chez SMA, ces onduleurs sont à l'origine utilisés pour des applications Off Grid et bénéficient d'un grand retour d'expérience. L'onduleur Sunny Island 5048 (Figure 5) correspond le mieux à notre besoin puisqu'en terme de puissance admissible il est l'égale du Sunny Boy 5000 TL.



Figure 5 : Onduleur SMA Sunny Island 5048

I.5 Sous système Véhicule électrique

Les modèles ainsi que les marques de véhicules présentés ci-dessous ne le sont qu'à titre indicatif. En effet au vu des montants du marché et des préconisations du code des marchés publics, la collectivité est dans l'obligation de passer par un appel d'offre public. Les véhicules présentés ci-dessous ne seront donc pas forcément ceux retenus suite à l'appel d'offre, en revanche ils nous renseignent sur la typologie (utilitaire, citadine...) du parc envisagé.

I.5.1 Scénario retenu

A l'issu de la réunion du 30/06/11, Mr le Maire a retenu la composition du parc électrique présenté ci-dessous. Pour rappel les modèles présentés peuvent différer à l'issu du résultat de l'appel d'offre public. Tous les véhicules présentés ici sont disponibles à la Réunion, les prix sont TTC et tiennent compte des bonus ADEME ou Eco. Les prix affichés correspondent aux versions de base sans aucunes options. Pour les 5 véhicules présentés ci-dessous, le montant des aides de l'état se porte à 12 000 € soit 11% du prix total de l'ensemble des véhicules. En tenant compte de ces aides, l'investissement initial pour ces 5 véhicules revient à 96 400 € TTC. A noter que les véhicules électriques vendus à la Réunion bénéficient de tarifs identiques à ceux de la métropole grâce à une fiscalité avantageuse, une absence d'octroi de mer, alors que cette taxe spécifique au DOM varie de 10.5 à 34% pour les véhicules thermiques (1).



Figure 6 : Scooter Vectrix MS1

Valeur unitaire: 10 300 €
Autonomie NEDC (2) : 70 km
Technologie de batterie : NiMH
Capacité du pack batterie : 3.7 kWh
Poids : 230 Kg
Vitesse maximale : 100 km/h
Mode de recharge : Mode 1

- Deux Scooter Vectrix MS1 destinés à la Police municipale en remplacement de 2 Peugeot Zenith.



Figure 7 : Renault Kangoo ZE

Valeur unitaire : 16 300 €
Location des batteries : 79 €/mois
Autonomie NEDC : 170 km
Technologie de batterie : Li-ion
Capacité du pack batterie : 24 kWh
Vitesse maximale : 130 km/h
Charge utile : 650 kg
Mode de recharge : Mode 3

- Un Renault Kangoo ZE destiné au service environnement de la collectivité en remplacement d'un Citroën Berlingo.



Figure 8 : Mitsubishi i-MiEV

Valeur unitaire : 31 500 €
Autonomie NEDC : 150 km
Vitesse maximale : 130 km/h
Technologie des batteries : Li-ion
Capacité du pack batterie : 16 kWh
Mode de recharge : Mode 2

- Une Mitsubishi i-MiEV destinée aux services techniques en remplacement d'une Citroën C3.



Figure 9 : Goupil G3

Valeur unitaire : 28 000 €
Autonomie NEDC : 100 km
Vitesse maximale : 40 km/h
Technologie des batteries : Plomb ouvert
Capacité du pack batterie : 15.4 kWh
Charge utile : 500 kg

- Un Goupil G3 destiné au service environnement en remplacement d'un Nissan Cabstar.

1.5.2 Equivalent thermique

A titre de comparaison économique, voici le parc de véhicules thermiques équivalent en termes de gamme d'équipements et de confort. A noter que les véhicules thermiques vendus à la Réunion subissent une majoration de prix d'environ 30% par rapport à la métropole.



Valeur unitaire : 5 500 €
Cylindrée : 125 cc
Consommation mixte: 3.5 L/100km
Rejet de CO₂ : 90 gCO₂/km

Figure 10 : Scooter Yamaha XMAX 125

- Deux Scooters Yamaha XMAX 125cc équivalent aux scooters Vectrix MS1.



Valeur unitaire : 17 300 €
Consommation mixte: 5.3 L/100km
Rejet de CO₂ : 140 gCO₂/km
Charge utile : 667kg
Motorisation : 1.4L Diesel 6cv

Figure 11 : Renault Kangoo dCi 70

- Un Renault Kangoo SL17 dCi70 équivalent au Kangoo ZE.



Valeur unitaire : 19 600 €
Consommation mixte: 4.1 L/100km
Rejet de CO₂ : 104 gCO₂/km
Motorisation : 1.4L HDI 5cv

Figure 12 : Citroën C3 HDI 70

- Une Citroën C3 HDI 70 équivalent à l'i-MiEV.



Valeur unitaire : 22 200 €
Consommation mixte: 9.4 L/100km
Rejet de CO ₂ : 236 gCO ₂ /km
Charge utile : 1 500 kg
Motorisation : 3L Diesel 12cv
Vitesse maximale : 125 km/h

Figure 13 : Toyota Dyna 100 Simple Cab

- Un Toyota Dyna 100 Simple Cab base équivalent au Goupil G3.

Le total de ce parc thermique se porte à 70 100 € TTC. Quant à la moyenne des émissions de CO₂ elle s'élève à 132 gCO₂/km, cet ensemble de véhicule respecte donc les préconisations de l'Europe pour la mise en circulation de véhicules d'ici à 2012 (Cf. Chapitre 1 §1.1).

1.5.3 Une seconde vie pour les batteries ?

La démarche de seconde vie a pour but de valoriser techniquement et économiquement les batteries de traction qui ne sont plus utilisables pour les applications des véhicules électriques et hybrides rechargeables, mais qui conservent des performances pouvant satisfaire d'autres applications, tels que les réservoirs d'énergie pour des applications stationnaires (dans notre cas le sous système batterie tampon). Les pouvoirs publics, constructeurs automobiles, fabricants de batteries, ont initié une étude (pilotee par l'ADEME) dans le but de :

- ✓ déterminer les caractéristiques de fin d'utilisation des batteries dans les véhicules électriques et hybrides rechargeables ;
- ✓ identifier les usages possibles en seconde vie ;
- ✓ évaluer les contraintes de reconditionnement en fonction des usages identifiés ;
- ✓ définir les conditions de viabilité technique, économique et environnementale de reconversion des batteries des véhicules électriques et hybrides rechargeables, pour les applications identifiées.

Par ailleurs, les constructeurs automobiles et les producteurs français de batterie se sont engagés à prendre en compte, dès la conception des batteries, leur cycle de vie complet.

1.6 Sous système borne de recharge

1.6.1 Les différents types de charge

Pour la recharge des véhicules électriques, il existe 3 types de charge qui se différencie aux yeux de l'utilisateur essentiellement par la durée de branchement du véhicule (1).



Figure 14 : Les différents types de charge pour les véhicules électriques (2)

Dans notre cas, la collectivité utilise ses véhicules uniquement pendant les horaires de travail du personnel soit de 8h30 à 16h30. La recharge des véhicules se fera donc la nuit, en effet le créneau où les véhicules sont au repos est largement suffisant afin d'opter pour un type de charge normale en à peu près 6h (pour une batterie de 25 kWh déchargée complètement). De plus afin de prolonger la vie des batteries il est recommandé de privilégier les charges normales au détriment des autres charges semi-rapide et rapide. Le séquençage de la recharge est expliqué plus en détails au paragraphe II.4 de ce chapitre.

I.6.2 Les différents modes de charge

Il existe plusieurs modes de recharge pour les véhicules électriques, tous ces modes respectent la norme IEC 61851.

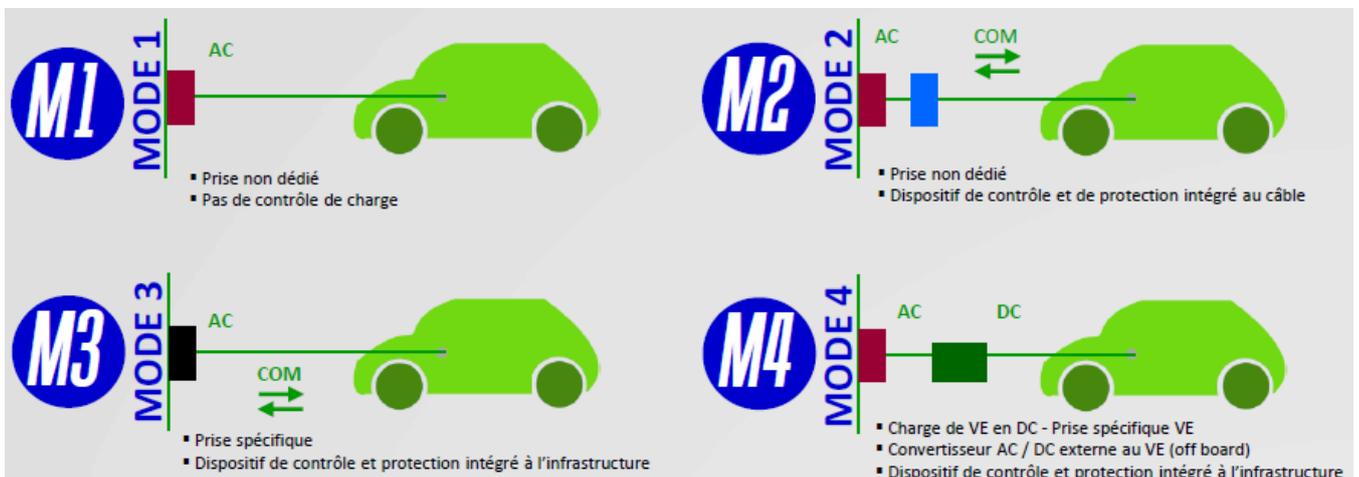


Figure 15 : Les différents modes de charge pour véhicules électriques (2)

Afin de converger vers une standardisation européenne voir mondiale, les constructeurs présents sur le marché du véhicule électrique se consultent régulièrement. Il n'est pas impossible que les années à venir voient naître un mode de recharge unifié et standardisé pour tous les véhicules électriques.

I.6.3 Borne de recharge préconisée

Dans notre cas, la composition de notre flotte électrique (Cf. §1.5) impose que les modes de recharge 1,2 et 3 doivent être supportés par les bornes de recharge. Pour rappel le type de



recharge retenu est la recharge normale ou parfois appelée lente dans la littérature. Pour les simulations, il a été retenue une marque DBT (numéro un mondiale des solutions de recharge). Leur réputation n'est plus à faire dans le milieu et la gamme de produit qu'ils proposent correspond exactement à nos besoins système. Leur borne BBR présentée ci-contre semble la plus adaptée à notre besoin. Ces bornes comportent deux prises chacune, il nous faut donc 3 bornes pour nos 5 VE. L'installation de ce genre de borne nécessite un peu de génie civil, les plans nécessaires sont détaillés dans le dossier technique en Annexe F. Néanmoins, l'acquisition des bornes de recharge se faisant via l'appel d'offre et au vue du panel de constructeur présent sur le marché, il est possible qu'un autre équipement soit retenu lors de la réponse à l'appel d'offre.

I.7 Sous système contrôle commande

Le contrôle commande de l'installation peut s'effectuer de deux façons : via un automate conçu spécialement pour le système ou via la programmation de l'onduleur/chargeur qui pour rappel est au centre des éléments clés de l'installation. Cette dernière solution n'est envisageable que si l'onduleur à la possibilité de recevoir un bloc de programmation externe. Dans les deux cas, le système de contrôle commande devra être capable de mettre en œuvre l'ensemble des 7 phases décrites au paragraphe II de ce chapitre. La fiabilité du système contrôle commande doit donc être irréprochable à tout instant. En quelque sorte ce sous système est le cœur même du système puisque c'est sous ses consignes que les véhicules vont se recharger, que l'énergie va être stockée, déstockée, injectée au réseau... Une attention toute particulière doit donc être apportée à la mise en place d'un tel sous système. Son suivi est primordial dans le bon fonctionnement de la station de recharge solaire. Dans cette optique de suivi régulier, idéalement un rapport d'erreur pourrait être généré chaque jour et envoyé par courriel à la personne en charge de la maintenance de l'installation.

I.8 Sous système monitoring expérimental

Le monitoring de l'installation est une fonctionnalité primordiale dans un projet pilote tel que celui-ci où le retour d'expérience constitue la principale rente du propriétaire de l'installation (Cf. § II.3). Aujourd'hui il n'existe pas de système de monitoring clé en main pour une telle installation, c'est pourquoi ce sous système a été divisée en deux parties : monitoring de l'installation photovoltaïque et monitoring du parc de véhicules électriques.

I.8.1 Monitoring Photovoltaïque et stockage

Dans le cas où les onduleurs SMA présentés au § I.4 seraient retenus à la suite de l'appel d'offre, une solution de monitoring très complète proposée par la société SMA peut être envisagée : la Sunny WebBox (Cf. Figure 17). C'est une puissante centrale de communication pour les centrales solaires : surveillance d'installation, télédiagnostic, sauvegarde et visualisation de données. Elle collecte en continu toutes les données des onduleurs, ce qui permet à l'exploitant d'être informé à tout moment de l'état de son installation. L'accès à ces données se fait via le Sunny Portal, il suffit de disposer d'une simple connexion internet. Les données sont archivées et stockées sur ce portail web, le retour d'expérience se matérialise donc par la mise à disposition d'une base de données complète sur la production photovoltaïque mais également sur la quantité d'énergie stockée et déstockée dans le système de stockage tampon. En effet la Sunny WebBox est compatible avec tous les onduleurs de la marque SMA y compris les onduleurs Sunny Island (Cf. § I.4.2) destinées à gérer les phases de charge et décharge des batteries. Cette solution clé en main proposée par SMA est à la fois la plus aboutie et la

plus complète du marché. De surcroît elle est en mesure de répondre à toutes nos attentes en termes de capitalisation de retour d'expérience dans le cadre de notre projet.

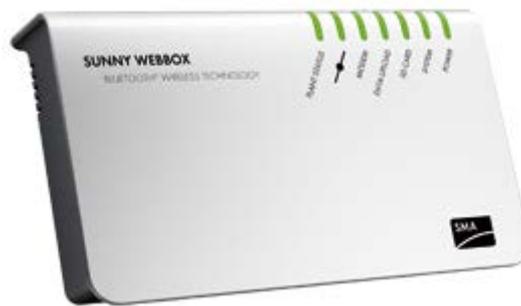


Figure 17 : Sunny WebBox SMA

I.8.2 Monitoring VE

Le monitoring du parc de véhicules électriques représente également un enjeu important dans le cadre de notre projet. Il nous permettra de connaître précisément les besoins énergétiques des véhicules au jour le jour durant toute la vie du véhicule. Encore une fois, à la condition que les bornes de recharges préconisées au paragraphe I.6.3 soient retenues à l'issue de l'appel d'offre, le constructeur de ces bornes DBT propose un coffret de communication : une solution très complète de monitoring (Cf. Figure 18). A l'instar de la Sunny WebBox, ce coffret de communication fait remonter les informations via un portail web accessible en tout temps depuis la toile. Parmi ces multiples fonctionnalités, on relèvera celles qui ont le plus d'intérêts pour notre projet :

- ✓ Information en temps réel de l'état des bornes : *Visualisation simple et rapide sous formes d'icônes de l'état des bornes (charge en cours, hors service, réservée, ...), information ponctuelle sur la consommation actuelle des bornes pour gestion optimisée du réseau électrique.*
- ✓ Gestion de parc de bornes : *Synthèse et bilan sur le taux d'utilisation des bornes, analyse des puissances consommées et influence sur le réseau, gestion des réservations et disponibilités de bornes.*
- ✓ Statistiques sur les consommations : *Puissance électrique totale, heures et taux d'utilisation des bornes.*
- ✓ Site Web gestion compte utilisateur : *Site avec accès client pour chaque utilisateur, Visualisation et gestion basique du compte client (informations personnelles, rechargement, historique, ...).*

Ces fonctionnalités sont la clé de voute d'un retour d'expérience complet.



Figure 18 : Coffret de communication DBT

II. PHASES DE FONCTIONNEMENT

Les différentes phases de fonctionnement du système tout au long d'une journée typique sont détaillées dans cette partie. Il est important de comprendre que si l'algorithme de gestion du système ne respecte pas ces phases c'est la viabilité du projet et de son étiquette verte qui sera mise à mal. Afin d'atteindre les objectifs en terme de rejet de CO₂ que nous verrons au chapitre suivant, il est primordial que l'algorithme de contrôle commande du système soit bien paramétré selon le séquençage décrit ci-après.

II.1 Recharge de la batterie tampon

Comme indiqué au paragraphe I.4 précédent, l'onduleur est en quelque sorte le cœur du système. C'est par lui que vont transiter tous les électrons produits ou consommés. Sa fonction vitale au système le place donc au centre des figures qui vont suivre. La Figure 19 ci-dessous représente schématiquement la toute première action du système en début de journée lorsque le soleil se lève et que la production photovoltaïque démarre : la recharge de la batterie tampon. Lors de cette phase, les électrons photovoltaïques vont transiter d'abord par le sous système onduleur pour être ensuite acheminés vers le sous système batterie tampon. Le parc de batteries tampon va donc se recharger au fil de la production photovoltaïque durant la journée. Pour rappel les véhicules électriques ne sont pas encore branchés puisqu'ils sont réquisitionnés par les employés pour la journée.

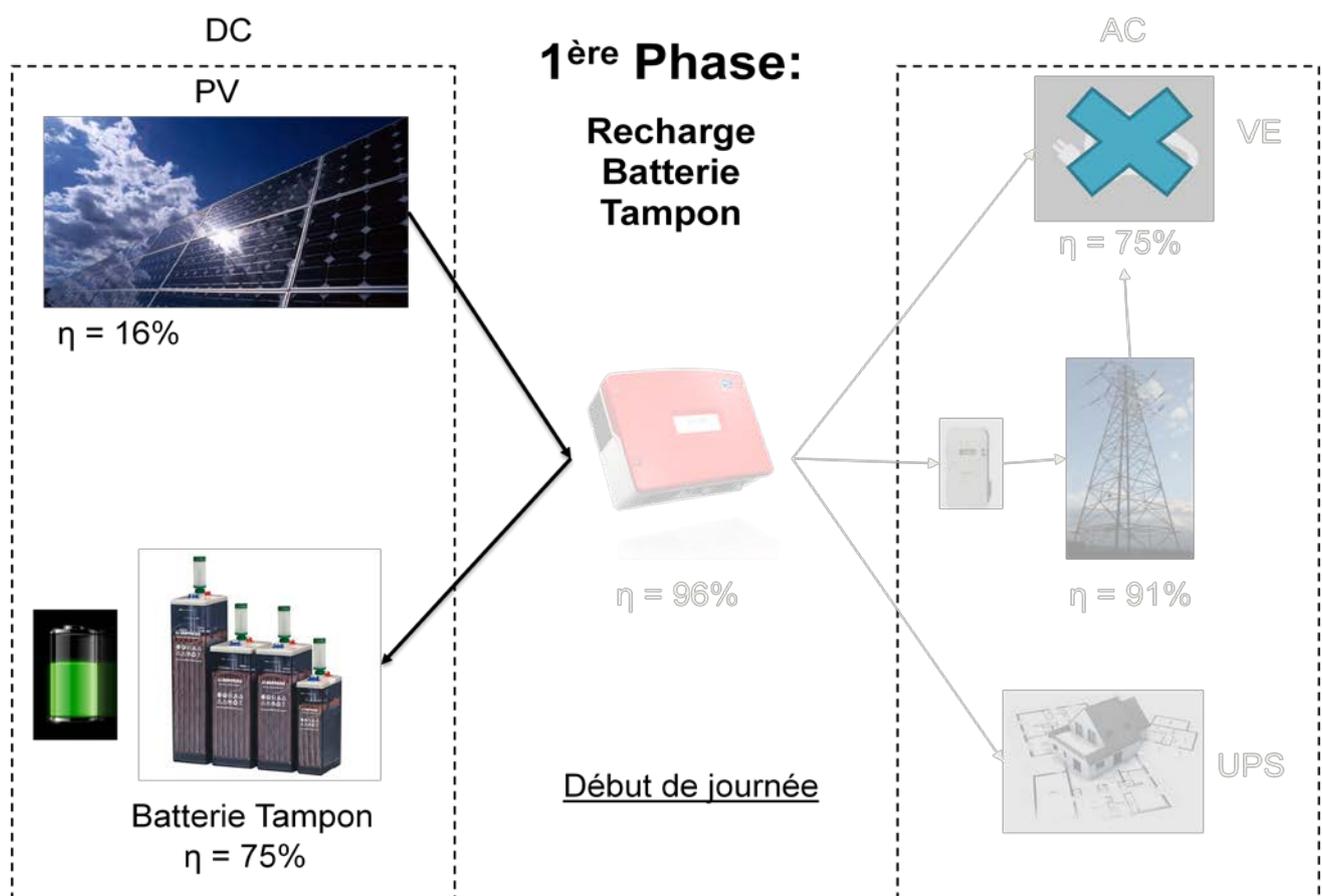


Figure 19 : 1^{ère} phase : recharge de la batterie tampon

II.2 Injection sur le réseau de l'excédentaire PV

La deuxième phase débute lorsque les batteries tampon sont rechargées à 100% de leur capacité. Si ce n'est pas le cas, et cela peut arriver les jours où la production PV est quasi nulle, alors cette phase

sera tout simplement évincée du processus. La 2^{ème} phase consiste donc à l'injection des électrons photovoltaïque sur le réseau toujours via le sous système onduleur. Lors de cette phase de revente de l'énergie, le prix du kWh revendu est soumis au contrat d'achat conclu avec EDF. Les véhicules électriques quant à eux ne sont pas encore branchés.

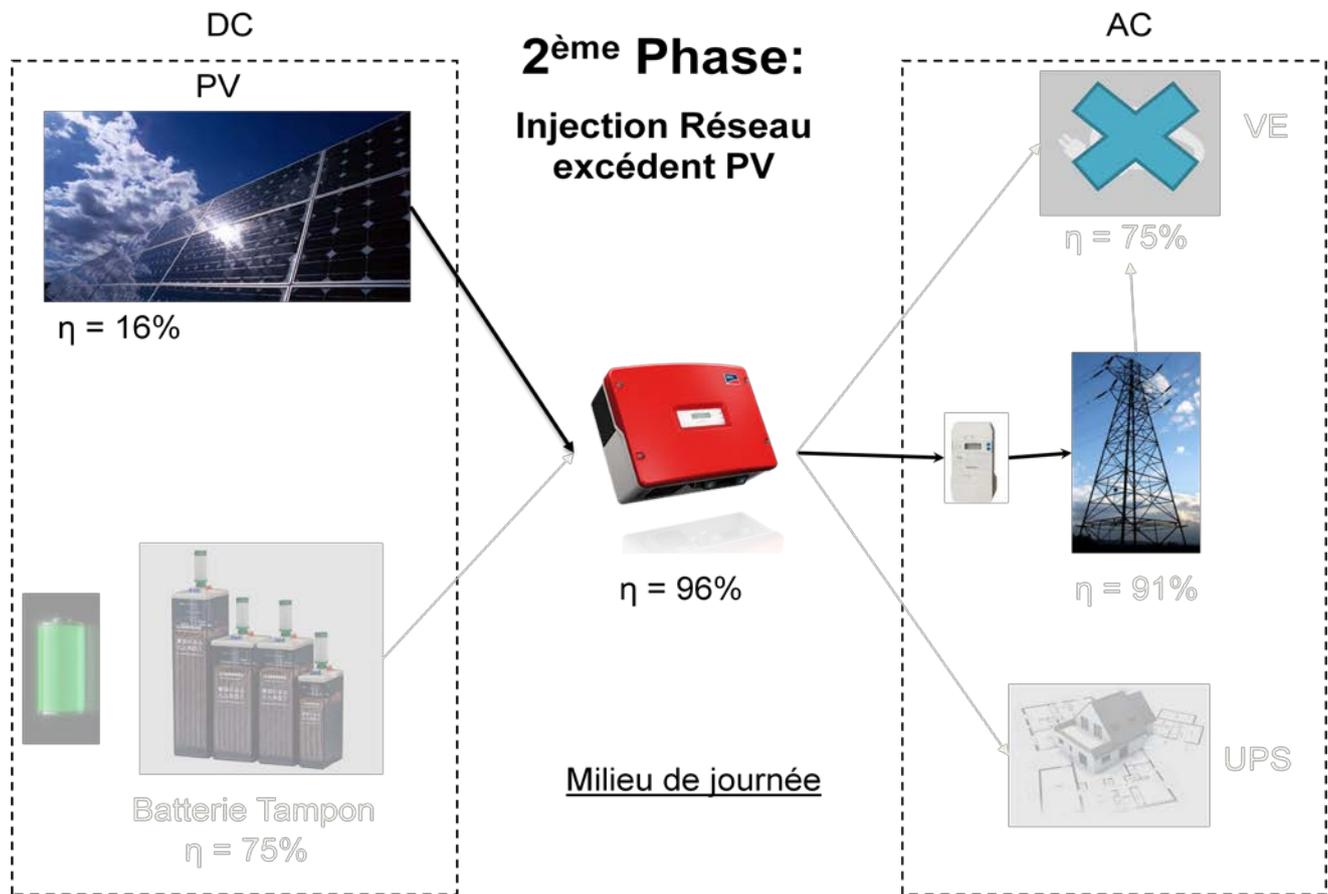


Figure 20 : 2- phase : injection sur le réseau de l'excédentaire PV

II.3 Peak Shaving

Le Peak Shaving ou encore écrêtage consiste comme son nom l'indique à écrêter la courbe de charge. Le stockage de l'énergie se fait durant la journée et est restitué lors des pics de consommation. Cela permet de reporter des investissements en moyens de production et en renforcement de réseau, concrètement cela évite à EDF de démarrer des moyens de production à très fort contenu carbone lors des pics de consommation de sa clientèle. La Figure 21 ci-dessous présente le principe du Peak Shaving.

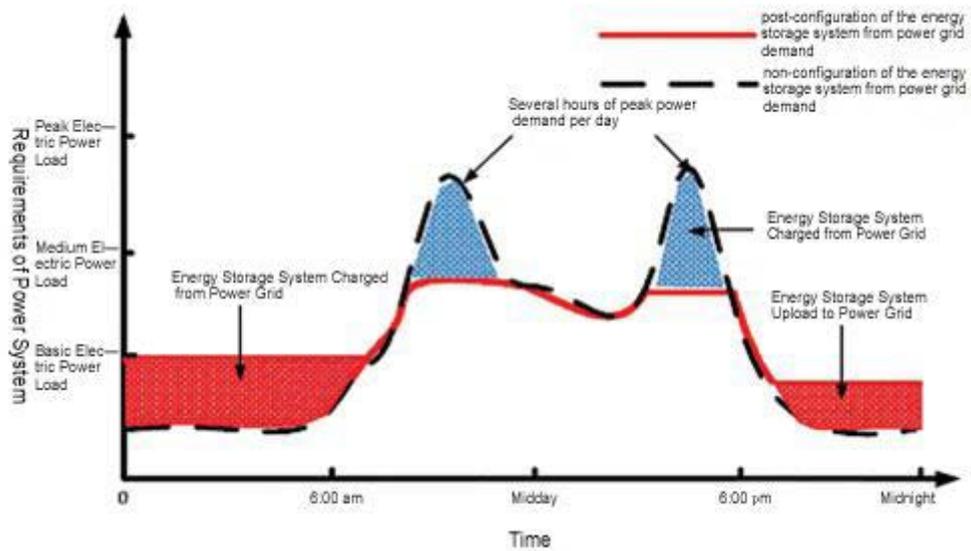


Figure 21 : Illustration du principe de Peak Shaving

II.3.1 Peak Shaving photovoltaïque

La 3^{ème} phase est sensiblement identique à la 2^{ème} à la différence près que l'injection sur le réseau se fait lors des périodes de pointe de consommation (18h-21h). Cette phase intervient principalement durant l'été austral où il n'est pas rare que l'irradiation directe (i.e. production photovoltaïque) soit encore présente à ces heures. On remarquera qu'à ces horaires les véhicules électriques sont branchés mais pas encore rechargés. Pour rappel cette 3^{ème} phase ne peut s'effectuer à la condition sinequanone que la batterie tampon a été rechargée à 100% durant la journée.

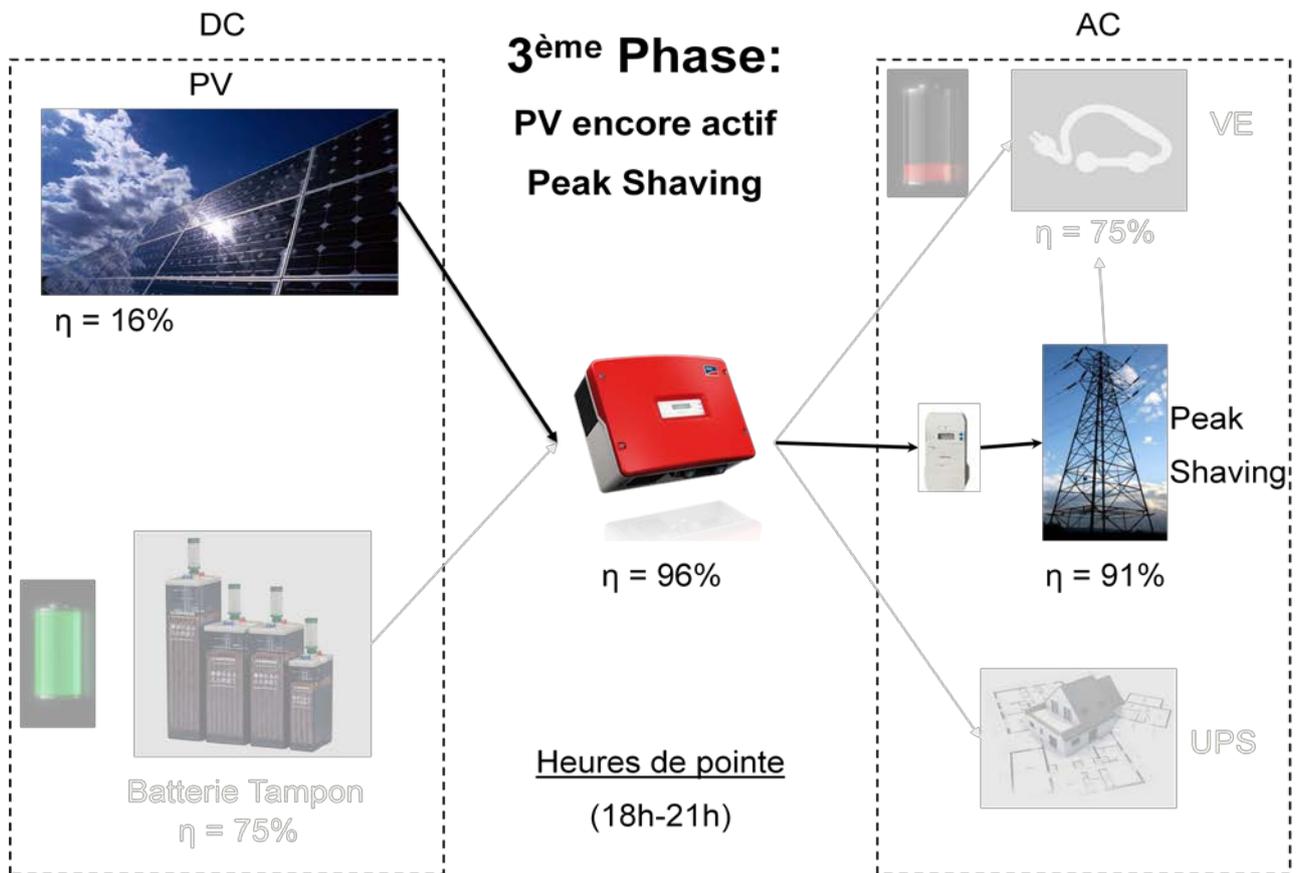


Figure 22 : 3- phase: Peak Shaving lorsque le photovoltaïque produit encore des électrons

II.3.2 Peak Shaving batterie tampon

Cette séquence de Peak Shaving via la batterie tampon est une des fonctionnalités que peut offrir le système. Reste l'aspect financier de cette phase qui n'est pas du tout à l'avantage du propriétaire du système. En effet lors de cette phase, de l'énergie contenue dans les batteries tampon va être redélivrée au réseau au moment de la pointe de consommation. Cela implique donc que les batteries tampon vont effectuer plus de cyclage qu'il n'en faut pour le bon fonctionnement du système. Le fait qu'EDF ne propose pas de contrat de rachat avec majoration de l'énergie revendue pendant les heures de pointe ne va pas inciter le propriétaire du système à revendre son énergie à ces heures. Il est à noter qu'en Allemagne, de tel contrat tarifaire existe depuis peu et cela à tendance à relancer le marché du stockage de l'énergie. L'algorithme de gestion de l'énergie du système doit prendre en compte le fait qu'il faut tout de même privilégier la recharge des véhicules électriques au détriment de l'écrêtage. Comme nous le verrons par la suite, les véhicules électriques devant être rechargés à 100% chaque jour, l'algorithme doit être capable de mettre en regard la quantité d'énergie présente dans la batterie tampon et celle qui fait défaut dans les « réservoirs » des véhicules. Si la quantité d'énergie requise pour la recharge à 100% des véhicules est supérieure à la quantité d'énergie disponible dans la batterie tampon alors en aucun cas cette 4^{ème} phase n'aura lieu.

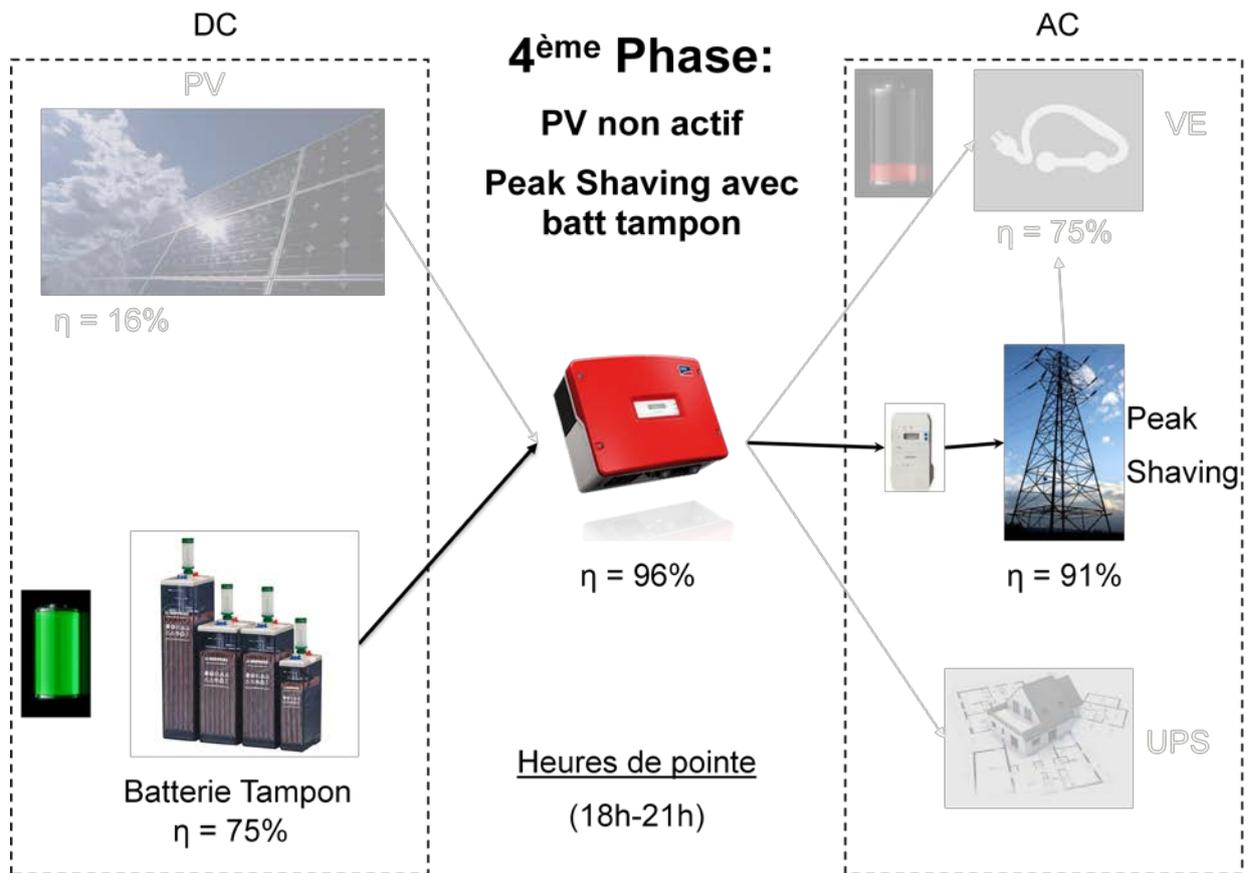


Figure 23 : 4- phase : Peak Shaving avec utilisation de la batterie tampon

II.4 Recharge des véhicules électriques

La recharge des véhicules électriques se fera uniquement pendant les heures creuses afin de diminuer les perturbations occasionnées lors d'une recharge éventuellement à partir du réseau. Le type de recharge normal est privilégié car les véhicules sont immobilisés pendant plus de 8h. Pour rappel ce type de recharge prolonge la durée de vie de la batterie car l'intensité du courant qui est délivré à la batterie est faible ce qui implique que les réactions électrochimique ne sont pas « brusqués », l'électrolyte et les électrodes sont ainsi préservées plus longtemps. L'amplitude des déplacements des employés municipaux étant très difficilement prévisible, le système doit impérativement recharger les véhicules à 100% toute les nuits. On privilégiera une recharge via la batterie tampon, la recharge via le réseau est une situation qu'il faut éviter au maximum afin de réduire l'impact carbone du système.

II.4.1 Recharge via la batterie tampon

Une fois la phase de Peak Shaving effectuée, le système doit recharger les véhicules électriques avec l'énergie restante dans la batterie tampon. Comme indiqué précédemment (§ II.3.2), si la phase de Peak Shaving a lieu c'est qu'il reste assez d'énergie dans la batterie tampon pour recharger les véhicules à 100% de leur capacité. La recharge se fait donc via l'onduleur qui va transformer le courant continu délivré par la batterie tampon en courant alternatif, ce dernier transitera par les bornes de recharge avant d'être acheminé aux véhicules. Si on tient compte des rendements énergétiques indiqués sur la Figure 24 ci-dessous, lors de cette phase de recharge 46% de l'énergie va être perdue ce qui n'est pas négligeable pour un tel système.

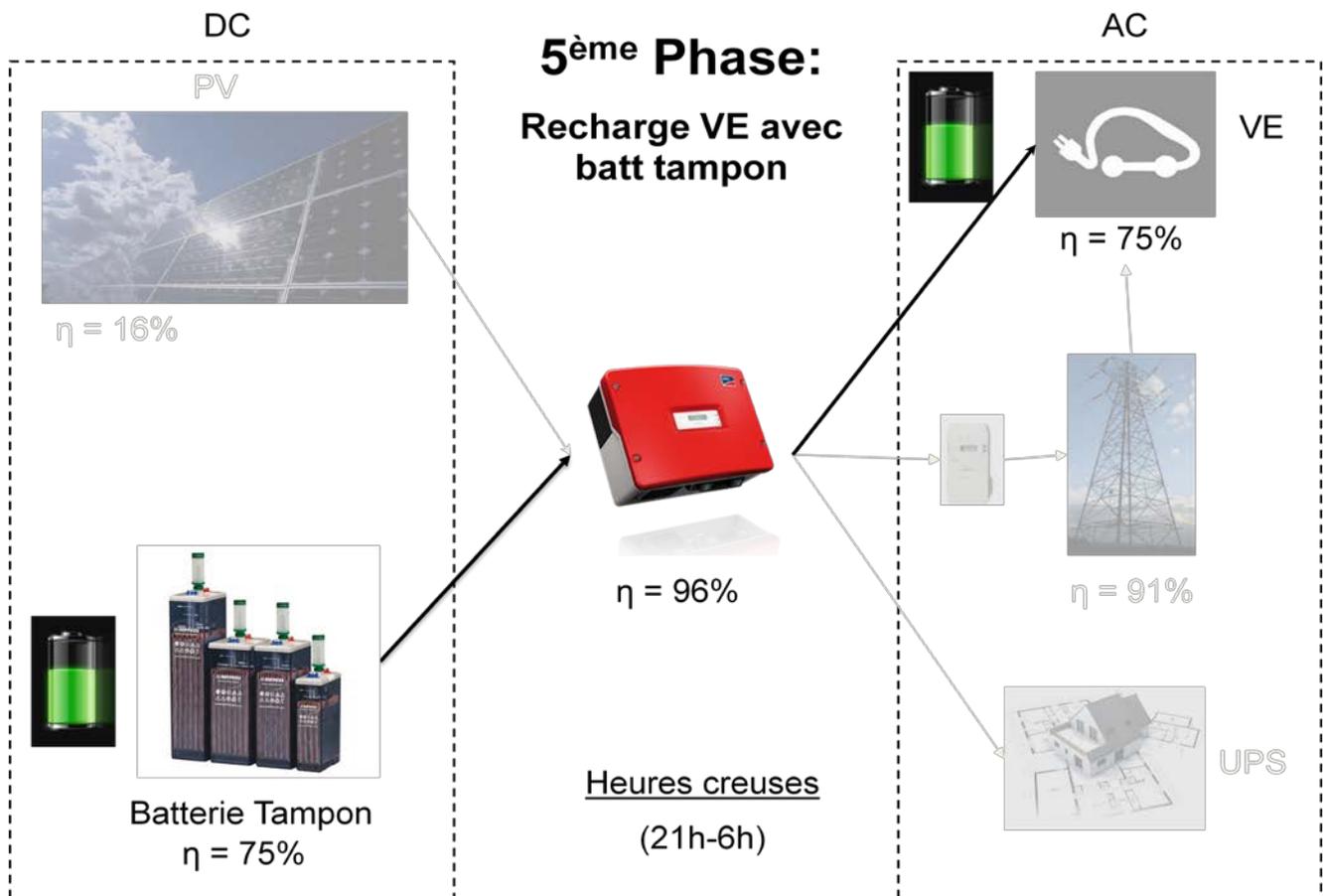


Figure 24 : 5- phase : recharge des véhicules électriques via la batterie tampon

II.4.2 Recharge via le réseau

Ce mode de recharge doit impérativement être minimisé car il est responsable à lui seul bilan carbone des véhicules électriques. La méthode de comptabilisation des émissions de carbones sera détaillée au paragraphe XX du chapitre suivant. Ce mode de recharge intervient donc uniquement dans le cas où les batteries tampon sont déchargées à leur profondeur de décharge maximale (DOD max) et ne peuvent par conséquent plus délivrer d'énergie toujours dans le but de recharger les véhicules à 100%. Ce cas de figure peut survenir lors de journées faiblement ensoleillées où les batteries tampon ne vont être que très peu rechargées par les panneaux photovoltaïques. Les électrons « gris » issues du réseau électrique vont donc transiter via un compteur d'achat EDF puis par les onduleurs avant d'arriver à destination des véhicules électriques.

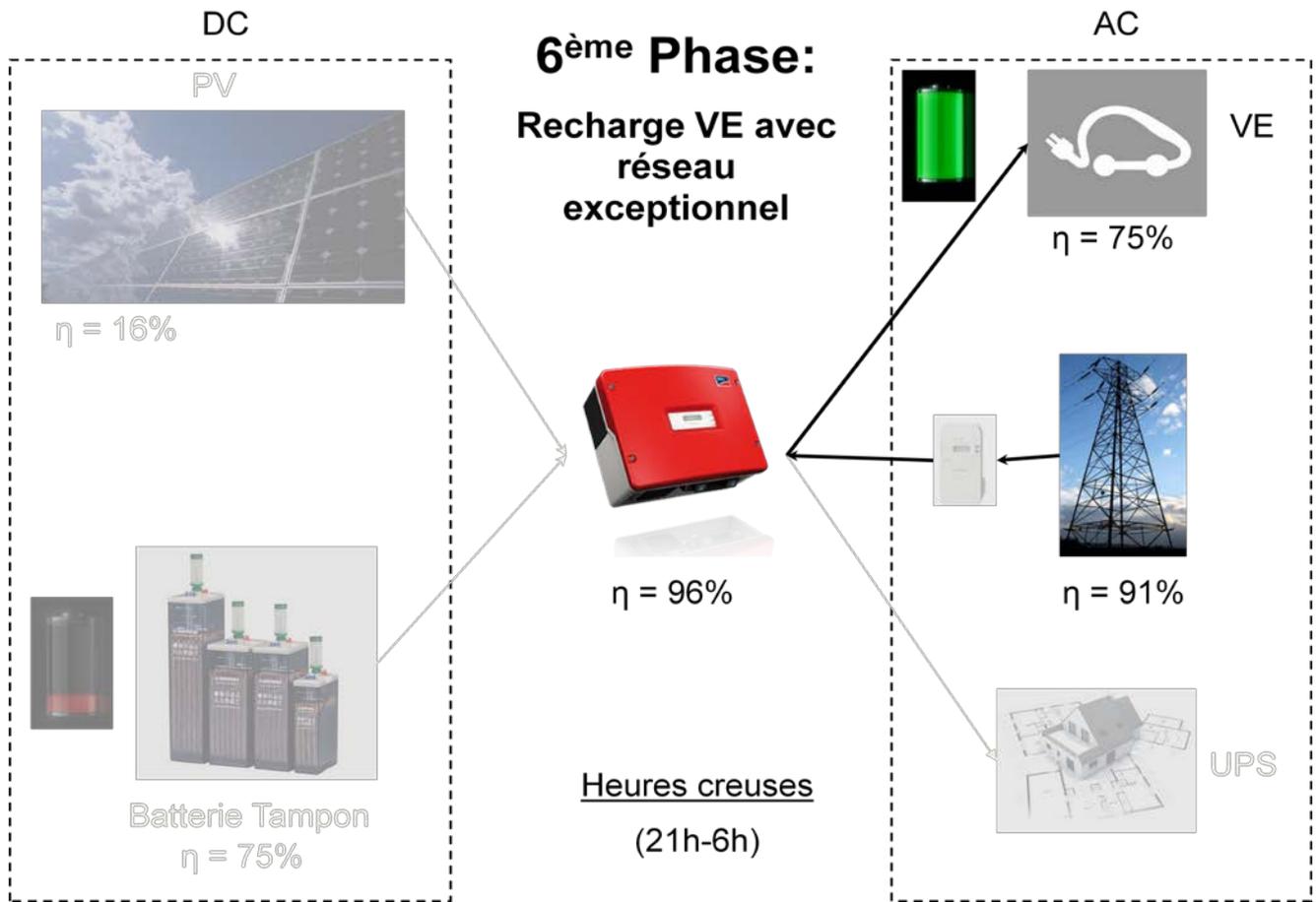


Figure 25 : 6- phase : recharge des véhicules électriques via le réseau

II.5 UPS

La probabilité d'occurrence de cette dernière phase est très faible car elle intervient uniquement lors de black out généralisé du réseau ou bien encore d'alerte cyclonique. Néanmoins c'est une fonctionnalité qu'offre le système donc cela mérite une explication. Cette phase UPS pour Uninterruptible Power Supply n'est en réalité rien d'autre que la mise à disposition de l'utilisateur d'une prise de courant standard 220V / 16A. Cette prise sera donc alimentée grâce au parc de batterie tampon dans la limite de l'énergie contenue dans ces batteries, là encore le système doit être capable de stopper la décharge des batteries tampon une fois leur seuil de décharge maximal atteint. Cette prise de secours peut s'avérer très utile, notamment à la police municipale dont les locaux sont adjacents à la future station de recharge solaire.

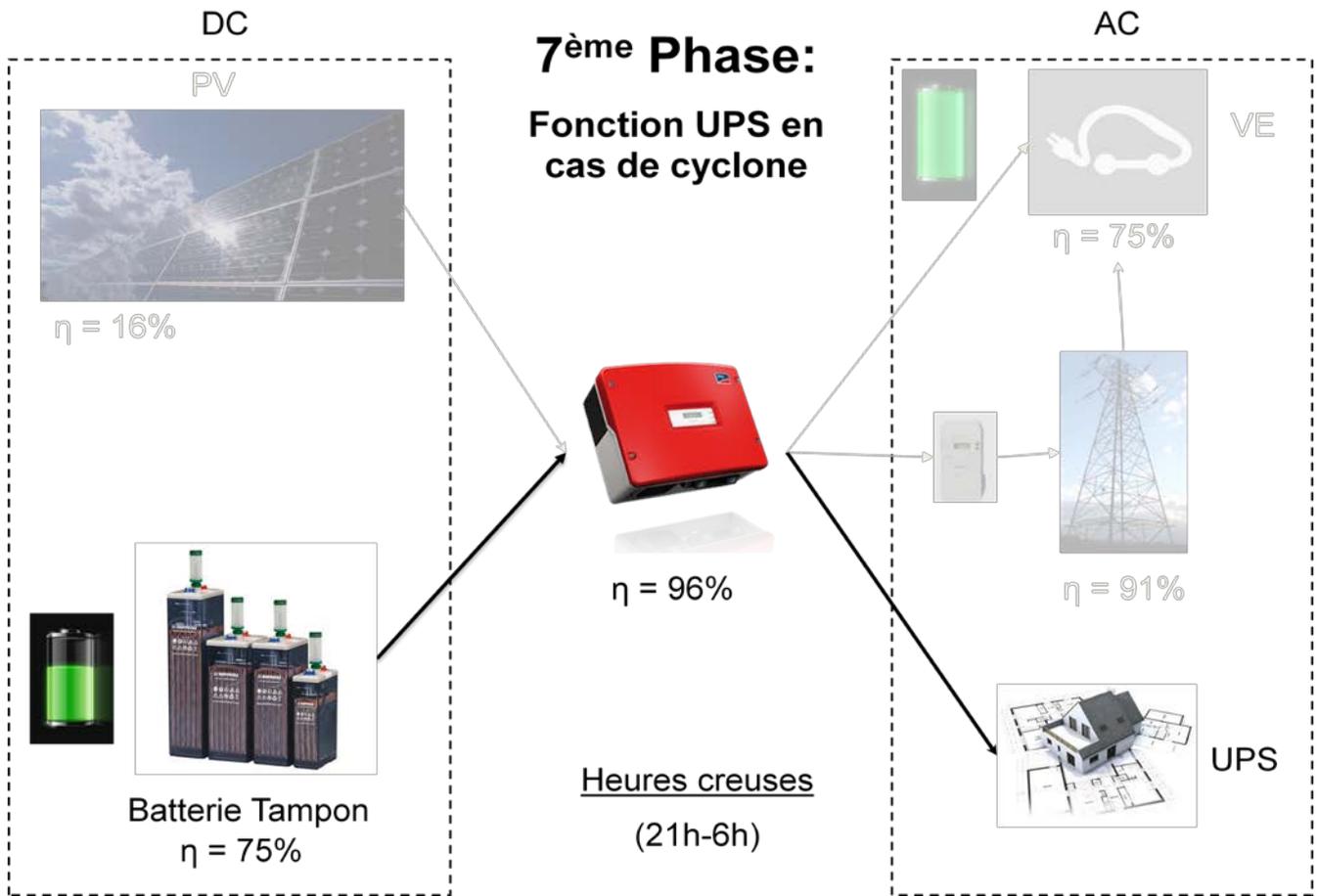


Figure 26 : 7- phase : Fonction UPS en cas d'alerte cyclonique

CHAPITRE 2 : OUTIL DE DIMENSIONNEMENT

Ce chapitre est consacré à l'essence même de ma thèse professionnelle : le développement d'un outil de dimensionnement qui se veut interactif et utilisable par tout un chacun. La question du dimensionnement aurait très bien pu être externalisée au projet pour être traitée par des bureaux d'études ou encore réglée hâtivement avec des calculs grossier ne prenant pas en compte la totalité des données d'entrée. Le développement d'un outil de dimensionnement pour un système d'une telle ampleur n'est pas quelque chose de trivial qui peut être réalisé avec un simple tableur comme Excel. En effet la quantité de données à traiter impose d'elle-même un outil de calcul qui se doit d'être robuste et performant. Notre choix s'est porté sur le logiciel Matlab, les motivations au choix de ce logiciel seront développées au paragraphe II.1. Ce chapitre retrace donc les différentes étapes de développement de l'outil, l'accent sera mis d'avantage sur le raisonnement et les résultats plutôt que sur les explications inhérentes au langage de programmation propre à Matlab.

I. OBJECTIFS

L'objectif de cet outil de dimensionnement n'est pas seulement de dimensionner l'installation, il offre également la possibilité de réaliser une approche économique de rentabilité différentielle ou encore de calculer le bilan carbone de l'installation. Le choix final du dimensionnement parmi toute les simulations se fera par ailleurs en fonction du bilan carbone de l'installation. Comme indiqué au chapitre précédent au paragraphe I.2, le bilan carbone des véhicules électriques en métropole est en moyenne de 14 gCO₂/km, soit environ 10 fois moins que le bilan des véhicules branchés sur le mix énergétique de la Réunion. L'objectif de ce projet est de faire aussi bien voir mieux que la métropole en terme d'émissions de CO₂, c'est pourquoi nous nous sommes fixés un objectif de 10gCO₂/km pour l'ensemble de notre parc de véhicules électriques. C'est là que réside le challenge d'un tel outil de dimensionnement: prévoir avec assez de précision et de justesse le bilan carbone d'un système relativement complexe intégrant un certain nombre de paramètres d'entrée à forte incertitude (irradiation, déplacement des véhicules...).

II. POURQUOI MATLAB ?

II.1 Avantages et inconvénients

Ce qui fait la force de Matlab c'est principalement sa capacité à manipuler des centaines de millions d'éléments en quelques secondes contrairement à Excel qui ne peut tracer un graphique contenant plus de 65000 points. En ce qui nous concerne nous avons en l'occurrence des données d'irradiation échantillonnées sur un an avec des acquisitions toutes les minutes. Néanmoins ce n'est pas la seule raison à l'emploi de Matlab ici, en effet la programmation en langage Matlab va nous permettre de créer un outil qui agira de manière interactive avec l'utilisateur. Celui-ci pourra donc effectuer des simulations pour différentes valeurs de puissance photovoltaïque et de capacité de stockage. Enfin le fait de pouvoir créer des routines de calculs va nous permettre de faire des simulations sur des gammes de puissances et de capacité plus ou moins importantes afin d'affiner le dimensionnement du système de stockage toujours en fonction du bilan carbone de celui-ci.

En revanche le principal frein à l'utilisation de Matlab reste qu'il s'agit d'un logiciel ayant son propre langage de programmation, son emploi nécessite donc des compétences solides en programmation. De plus le déboguer intégré ne compte pas parmi les plus performant et intuitif du marché.



II.2 Copyright

Matlab est un logiciel payant et relativement cher, par conséquent il ne peut pas être installé sur tous les postes informatiques de l'ARER. En revanche Matlab offre la possibilité de compiler des exécutables que l'on peut ensuite installer sur n'importe quel poste informatique Windows. De part cette fonctionnalité, l'outil de dimensionnement peut donc être considéré comme pérenne puisque moyennant quelques manipulations il peut être utilisé par les employés de l'ARER. Il devient alors important que l'outil soit arrivé à maturation lors de son déploiement car il n'est en aucun cas modifiable par la suite par l'utilisateur lambda.

III. SELECTION DES DONNEES D'ENTREE

Afin d'accroître la précision de l'outil de simulation, il est important que l'ensemble des paramètres d'entrée soient le plus représentatif possible de la réalité. Cette partie vise à exposer de manière exhaustive ces différents paramètres.

III.1 Données kilométriques

La prévision des trajets kilométriques des employés municipaux joue un rôle très important dans le dimensionnement du système. En effet plus le parc de véhicule va être amené à rouler, plus les besoins en recharge devront être importants et le système se doit d'être en mesure de répondre à cette demande en faisant appel le moins possible aux électrons gris du réseau. Pour réaliser ces prévisions, les carnets des véhicules thermique municipaux actuellement en circulation et voués à être remplacés par les véhicules électriques ont été dépouillés afin de réaliser des statistiques sur une année complète de roulage (Cf. Annexe I). Une fois ces données obtenues, elles sont intégrées dans une feuille Excel (Tableau 2 ci-dessous) qui va générer selon une loi statistique aléatoire les déplacements au jour le jour de chaque véhicule visé sur une durée de un an. Cette feuille Excel a été réalisée auparavant dans le cadre d'un stage portant sur l'étude des déplacements à la Réunion, la méthode de distribution statistique à portée ces fruits et n'est en aucun cas sujette à une remise en cause ici.

DATA			ALEAT	Total déplacement jour (km)
		LUNDI	0,7143	43,4
% de jours où il y a déplacement	100,0%	MARDI	0,0944	9,3
distance km annuel	14007,0	MERCREDI	0,7336	43,7
dist km/jour max	160,0	JEUDI	0,2991	29,6
dist km/jour typique	42,0	VENDREDI	0,919	81,9
% de jours où km/j +/- 10% dist typique	50%	SAMEDI	0,3772	37,3
% de jours de non déplacement	0%	DIMANCHE	0,8911	55,0
km moyen par jour déplacé	38,3	LUNDI	0,7749	44,4
km moyen par jour	38,349076	MARDI	0,761	44,2
		MERCREDI	0,0729	7,2
Nombre de déplacements par jour en voiture	% répartition	JEUDI	0,5211	40,2
0	0%	VENDREDI	0,498	39,8
1	100,0%	SAMEDI	0,0821	8,1
		DIMANCHE	0,0396	3,9
		LUNDI	0,6626	42,5
		MARDI	0,4272	38,6
		MERCREDI	0,8295	45,3
HYPOTHESES LOI DEPLACEMENT		JEUDI	0,155	15,3
eps 0 NUM	-53,2	VENDREDI	0,5501	40,6
eps 0 DEN	-84,2021	SAMEDI	0,6984	43,1
Eps 0	0,63201124	DIMANCHE	0,5137	40,0

Limite typique basse	0,38201124	LUNDI	0,9969	157,0
Limite typique haute	0,88201124	MARDI	0,8831	47,3
Pente 1	98,9994418	MERCREDI	0,9316	94,1
Pente 2	16,8084	JEUDI	0,1287	12,7
Pente 3	964,302909	VENDREDI	0,7472	44,0

Tableau 2 : Extrait de la feuille Excel génératrice des données kilométriques

Une fois les données kilométriques générées par la feuille Excel, l'outil de dimensionnement est programmé pour relever de manière automatique la colonne qui nous intéresse à savoir celle des déplacements journaliers. Le programme va créer une matrice des déplacements dans l'espace de travail de Matlab (Workspace) où sont stockées toutes les variables. Le programme va par la suite épurer cette matrice des déplacements en forçant à 0 km les jours correspondants aux week ends ainsi que les jours fériés, jours où les véhicules ne sont pas utilisés par les employés municipaux.

III.2 Données d'irradiation

Réunion est un territoire qui, de par son relief et l'orientation des vents (les Alizées soufflent du sud-est vers le nord-ouest) possède un ensoleillement qui varie fortement d'une zone à une autre. Pour résumer grossièrement, la zone de bord de mer possédera une période d'ensoleillement plus importante que celle des pentes, car les nuages viennent s'accumuler le long des montagnes au cours de la journée. De même, à quelques exceptions près, la partie centrale de l'île sera assez vite recouverte (dès la mi journée) d'une couverture nuageuse. La carte suivante illustre ces propos en découpant l'île en 4 zones d'ensoleillement : 6-8 h/jour, 5-7 h/jour, 4-6 h/jour et 3-5 h/jour.

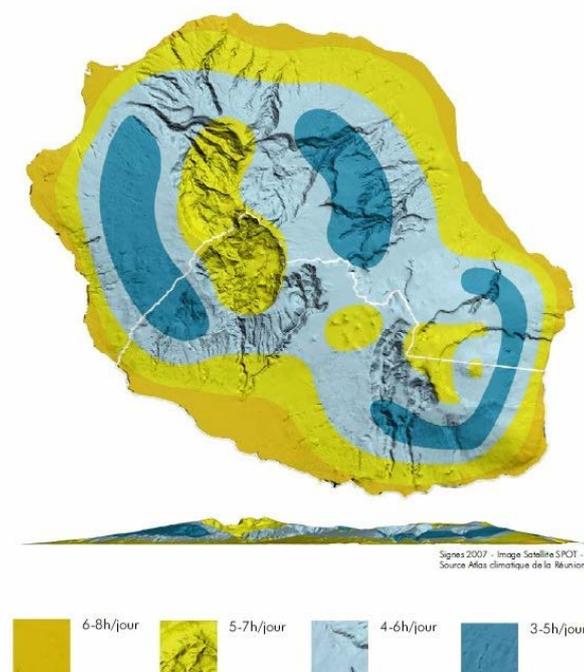


Figure 27 : Ensoleillement moyen journalier sur l'île de la Réunion (1)

Les données d'irradiation dont l'ARER dispose sont issues d'une campagne de mesure d'un an effectuée en 2006 aux quatre coins de l'île par 19 stations de mesures. Toutes ces stations de mesures à l'exception d'une ont fourni des données au pas horaire, la station de mesure situées à l'IUT de Saint Pierre quant à elle à fourni des données avec un pas d'une minute. Le travail de Bertrand Cadet (chargé

de projet Observatoire Energie Réunion) en 2009 à permis grâce à des méthodes statistiques (3) d'extrapoler les mesures des 18 stations au pas horaire à un pas de l'ordre de la minute et ce avec une marge d'erreur très faible. Ce sont ces données que l'outil de simulation prend en compte. Le fait d'avoir des données à la minute augmente significativement la précision des calculs. Afin que l'outil développé puisse effectuer des simulations pour des installations situées à divers endroits de l'île, il est proposé à l'utilisateur via un menu interactif de choisir la station météo la plus proche du lieu de son installation de transport solaire.



Figure 28 : Choix de la station météo

Dans notre cas la station la plus proche de notre installation qui se situe à Bras-Panon est la station de Saint-Benoît. Une fois ce choix effectué par l'utilisateur, Matlab va générer automatiquement un certain nombre de figures présentées ci-dessous :

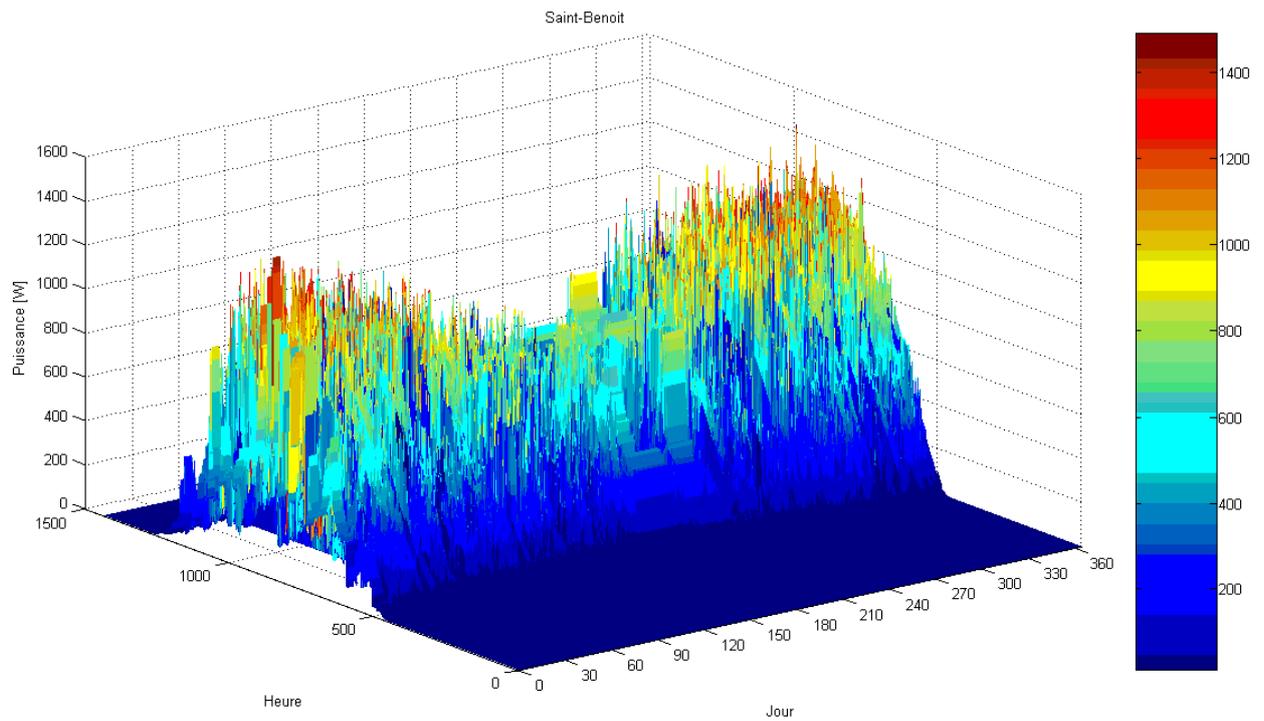


Figure 29 : Irradiation en fonction du jour et de l'heure de l'année

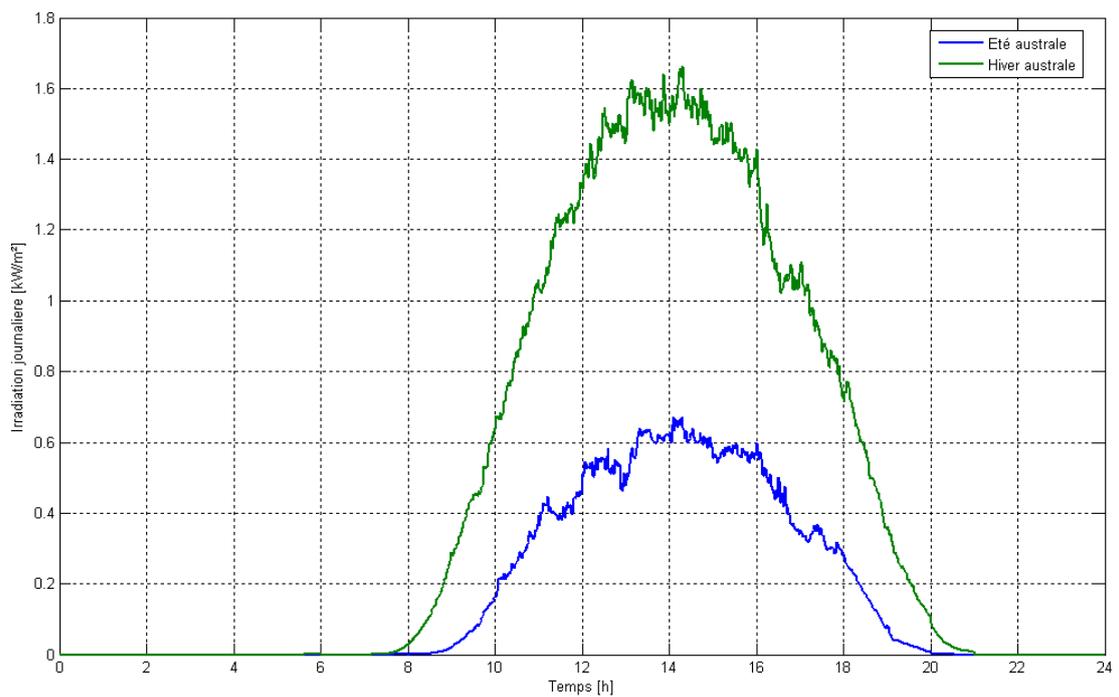


Figure 30 : Irradiation moyenne perçu sur une journée pour les deux saisons principales de la Réunion

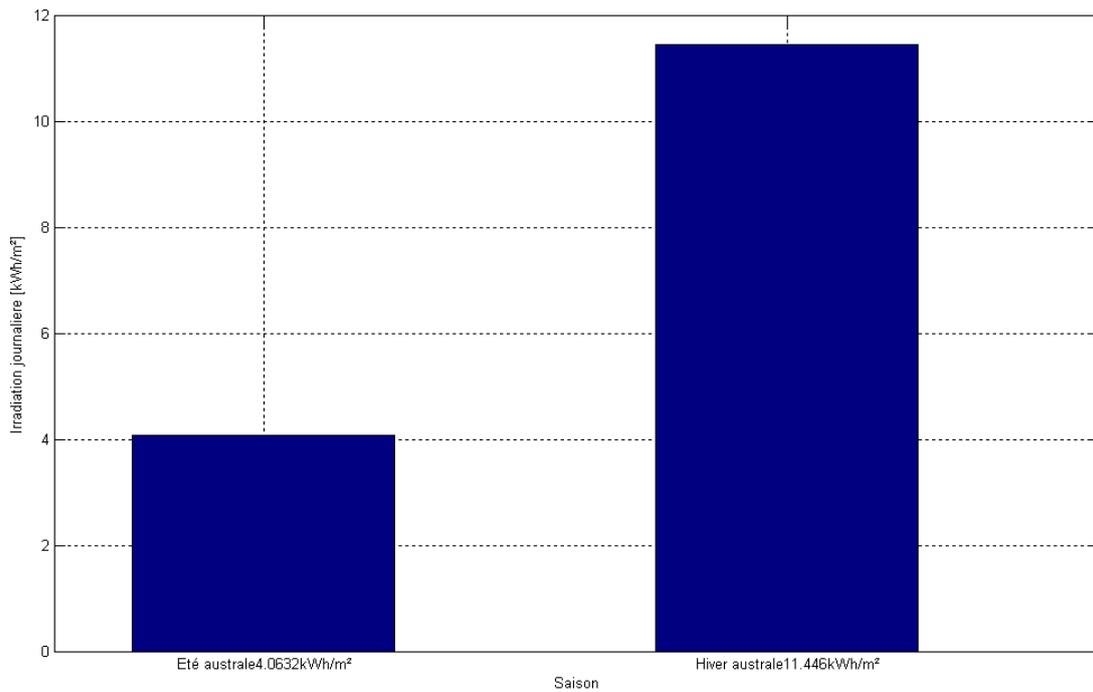


Figure 31 : Irradiation journalière en kWh/m² en fonction des saisons

Ces trois graphiques générés à la volé nous permettent d'avoir des indications sur l'ensoleillement du site choisi en fonction de la période de l'année. Un des principaux intérêts de Matlab est de pouvoir zoomer de manière très fluide sur ces graphiques, à l'usage cela s'avère extrêmement pratique malheureusement cette fonctionnalité ne peut pas être palpable dans ce rapport.

III.3 Données d'équipements

On entre ici dans une tout autre partie de l'outil de dimensionnement, la plupart des données d'équipements sont déjà pré-rempli et leur modification par l'utilisateur ne doit se faire à la seule condition que celui-ci possède une bonne connaissance de ces équipements. Dans cette partie nous n'aborderons pas les calculs qui sont engendrés par Matlab suite à la prise en compte de ces données d'équipements, ces calculs feront l'objet d'une partie à part entière : Cf. IV. Cœur du modèle de calcul.

III.3.1 Réseau

L'utilisateur est invité ici à renseigner la fenêtre de pourcentage d'énergie que le système de stockage tampon va pouvoir injecter sur le réseau en période de pointe (Cf. § 2.3.2). Lors des simulations la valeur de pourcentage d'énergie à injecter au réseau sera prise en compte et à chaque itération cette valeur sera incrémenté selon le pourcentage indiqué dans le champ « Incrémentation ». Par exemple les valeurs renseignées dans la Figure 32 ci-dessous indiquent au programme qu'il doit effectuer 10 simulations pour des pourcentages variant de 0% à 10% avec une incrémentation de 1% entre chaque simulation. De manière simple, de part cette fonctionnalité l'utilisateur pourra visualiser dans les résultats l'impact aussi bien économique que technique d'une revente de l'électricité contenue dans les batteries tampon aux heures de pointe.

Input réseau

Rendement du réseau [%]:
91

Energie min de la batterie tampon susceptible d'être dédiée au peak shaving [%]:
0

Energie max de la batterie tampon susceptible d'être dédiée au peak shaving [%]:
10

Incrementation [%]:
1

OK Cancel

Figure 32 : Données relatives au réseau électrique

III.3.2 Photovoltaïque

Dans ce formulaire l'utilisateur doit rentrer la gamme de puissance photovoltaïque pour laquelle il souhaite effectuer des simulations. Le principe d'incrémentation est également appliqué, pour exemple les valeurs de la Figure 33 ci-dessous indiquent au programme d'effectuer une série de simulation pour des puissances PV allant de 5 kWc à 35 kWc avec un pas d'itération de 5 kWc soit 7 simulations au total.

Module PV

Puissance crête mini du champ PV [kWc]:
5

Puissance crête maxi du champ PV [kWc]:
35

Incrementation [kWc]:
5

OK Cancel

Figure 33 : Données relatives à l'installation Photovoltaïque

III.3.3 Véhicules électriques

Cette séquence du programme permet à l'utilisateur de choisir la composition de son parc de véhicules électriques. Des scénarii de flotte de véhicules sont déjà préenregistrés dans le programme (Figure 34), ils correspondent aux flottes de véhicules étudiés dans le cas de la commune de Bras-Panon. Si l'utilisateur désire rentrer les caractéristiques de sa propre flotte de véhicule, il peut le faire en sélectionnant le champ « Autre » lors du choix du scénario.

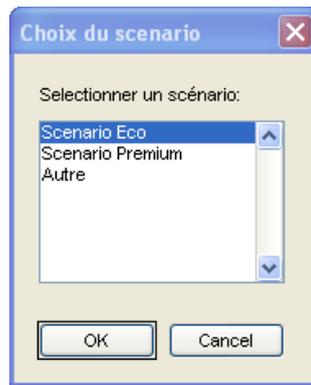


Figure 34 : Choix du parc de véhicules électriques

Pour l'exemple nous sélectionnons le champ « Scenario Eco » qui correspond au scénario retenu par Mr le Maire de Bras-Panon et décrit au paragraphe I.5.1 du chapitre 1. Une fois ce scénario sélectionné, une fenêtre pop-up s'ouvre dans le but de mettre en garde l'utilisateur sur la modification des données intrinsèques au parc de véhicules. En effet l'utilisateur ne peut se permettre de modifier ces données que s'il en est certain.

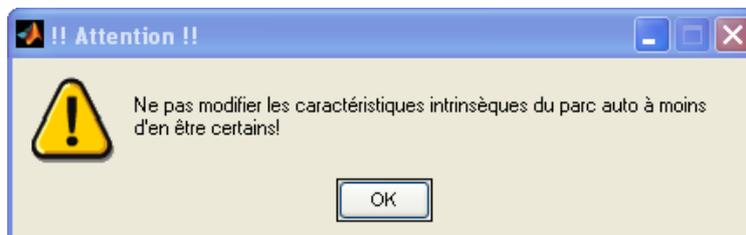


Figure 35 : Fenêtre pop-up d'avertissement

Une autre fenêtre vient ensuite s'ouvrir pour préciser la composition de la flotte de véhicules choisie. On retrouve ici les véhicules présentés au paragraphe I.5.1 du chapitre précédent.



Figure 36 : Indication de la composition du parc VE

Enfin la dernière étape consiste soit à valider les caractéristiques du parc de véhicules choisi, soit à rentrer ceux-ci un par un si l'on a choisi le scénario « Autre » à la première étape. Comme indiqué sur la Figure 37 ci-dessous, il est demandé l'autonomie NEDC (5), la consommation moyenne, la capacité totale du parc et le rendement moyen en charge-décharge des véhicules électriques. Ces caractéristiques concernent l'ensemble du parc auto, de ce fait ils sont obtenus en sommant les caractéristiques individuelles des véhicules. Les valeurs indiquées ci-dessous sont issues des fiches techniques des véhicules fournis par les constructeurs. La seule donnée qui n'est pas fournie par les constructeurs est le rendement moyen de charge-décharge du véhicule, la littérature scientifique s'accorde pour opter pour un rendement énergétique d'environ 80% pour des véhicules équipés de batteries au Lithium-Ion (6) (7).

Caractéristiques du parc de véhicules

Autonomie NEDC du parc [km]:
550

Consommation moyenne [kWh/100km]:
12.3

Capacité du parc VE [kWh]:
60.8

Rendement charge-décharge moyen [%]:
80

Disponibilité à la réunion:
Disponible

OK Cancel

Figure 37 : Caractéristiques de l'entité parc électrique

III.3.4 Pack batterie

La sélection du pack batterie est une étape cruciale dans le dimensionnement du système, les technologies dont les caractéristiques sont préenregistrées dans l'outil sont affichées dans la Figure 38 ci-dessous.

Choix du pack batterie

Selectionner un pack batterie:

- Plomb Ouvert
- CellCube FB 10-100
- Autre

OK Cancel

Figure 38 : Choix du pack batterie tampon

Dans notre cas nous avons décidé d'opter pour la technologie plomb tubulaire ouvert, pour rappel les motivations de ce choix sont explicitées au chapitre précédent § I.3.1. En ce qui concerne le pack batterie « CellCube FB 10-100 », il s'agit là d'un modèle de batterie à circulation de technologie Vanadium proposé par la société CellStrom. Les avantages et inconvénients de cette technologie sont répertoriés à l'Annexe B.1. Si l'utilisateur souhaite dimensionner son installation de stockage à l'aide d'une tierce technologie telle que le Li-Ion ou encore le Ni-MH il peut le faire en choisissant le champ « Autre » à cette étape.

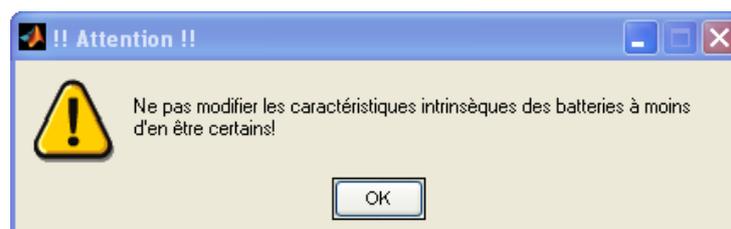


Figure 39 : Fenêtre pop-up d'avertissement

Une fois encore l'outil de dimensionnement se veut le plus interactif possible, c'est dans cette optique que des fenêtres pop-up apparaissent tout au long de la saisie des données afin de sensibiliser l'utilisateur aux conséquences que pourraient avoir une modification aléatoire dans les caractéristiques intrinsèques.

Figure 40 : Caractéristiques du système de stockage tampon

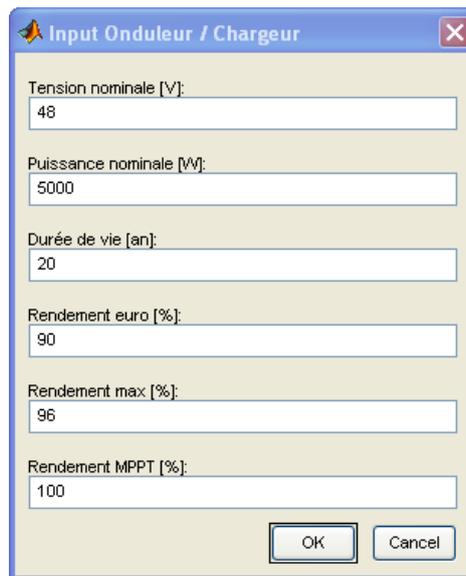
Pour terminer cette étape l'utilisateur doit soit valider les caractéristiques du parc de véhicules choisi, soit rentrer ceux-ci un par un si il a choisi le champ « Autre » lors de la première étape. Attention tout comme lors de la saisie des données PV et réseau, l'utilisateur doit choisir la gamme de capacité du parc batterie qu'il souhaite simuler et avec quelle incrémentation. Dans la Figure 40 ci-dessus, l'utilisateur souhaite effectuer 3 simulations : une pour un pack batterie de 10 kWh, une autre pour 20 kWh et enfin une dernière pour 30 kWh.

III.3.5 Onduleurs

Même principe que les étapes précédentes, l'utilisateur choisi son type d'onduleur avec la particularité pour les onduleurs SMA qu'ils vont par paire puisqu'il y a un onduleur et un onduleur/chargeur comme indiqué au chapitre précédent §1.4.

Figure 41 : Choix de l'onduleur

Une fenêtre invite ensuite l'utilisateur à valider les caractéristiques du type d'onduleur choisi, la Figure 42 représente ici les caractéristiques des onduleurs de la marque SMA.

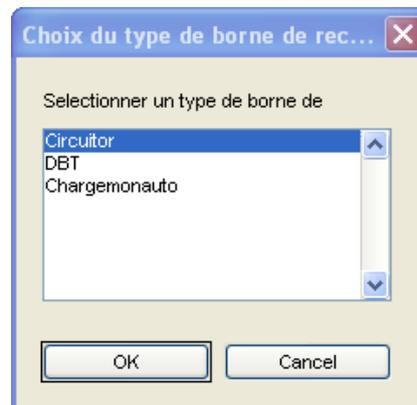


Paramètre	Valeur
Tension nominale [V]	48
Puissance nominale [W]	5000
Durée de vie [an]	20
Rendement euro [%]	90
Rendement max [%]	96
Rendement MPPT [%]	100

Figure 42 : Caractéristiques du système onduleur

III.3.6 Bornes de recharge

Pour finir le choix du type de borne de recharge s'offre à l'utilisateur.



Type de borne de recharge
Circuitor
DBT
Chargemonauto

Figure 43 : Choix du type de borne de recharge

III.4 Données économiques

Dans cette partie, l'utilisateur doit saisir ou valider l'ensemble des données économiques relatives au projet afin que l'outil puisse par la suite calculer la rentabilité du projet. Dans un premier temps l'utilisateur doit renseigner les principaux éléments de son montage financier à savoir la part de fond propre ainsi que son taux de rémunération et la part d'emprunts accompagné de son taux d'intérêt. La durée d'observation économique est fixée par défaut à 20 ans, durée contractuelle pour laquelle EDF s'engage à racheter l'électricité produite par le client. L'utilisateur a également la possibilité de spécifier un pourcentage de subvention qu'il pense espérer pour son projet. Le logiciel est conçu pour faire varier ce pourcentage avec le taux d'incrémentation et les bornes supérieurs et inférieurs spécifiés par l'utilisateur. Dans la Figure 44 ci-dessous, 5 simulations seront réalisés : la première pour

un taux de subvention de 0%, la deuxième pour un taux de 10% et ainsi de suite jusqu'à 50% de subvention.

The screenshot shows a dialog box titled "Input Economique generaux" with the following fields and values:

Paramètre	Valeur
Taux d'inflation [%]	2.5
Part fonds propres [%]	30
Taux rémunération fonds propres [%]	12.5
Part emprunts [%]	70
Taux d'intérêt emprunts [%]	7
Durée d'observation économique [an]	20
Pourcentage de l'investissement initial dédié au MOE [%]	5
Taux de subvention minimal en regard de l'investissement initial [%]	0
Taux de subvention maximal en regard de l'investissement initial [%]	50
Incrementation [%]	10

Buttons: OK, Cancel

Figure 44 : Données relatives à l'aspect économique général du projet

La fenêtre qui suit (Figure 45) est dédiée aux aspects économiques de l'installation photovoltaïque. Dans notre cas les simulations vont se faire entre 5 et 35 kWc (Cf. § III.3.2), en supposant que nous sommes en situation de semi-intégré bâti, le tarif appliqué par EDF dans cette configuration est de 30,35 c€/kWh (Cf. Annexe C). Les autres coûts liés au PV sont complétés par défaut et correspondent à la configuration de notre projet. Exemple de la distance au point de raccordement : Chapitre 3 § I.

Figure 45 : Données économiques concernant l'installation PV exit onduleurs

Comme nous le verrons au chapitre suivant § II. Aspects juridiques, aucun texte de loi n'oblige à ce jour EDF à racheter l'électricité issue d'un système de stockage électrochimique à un tarif identique à celui du PV. L'outil offre donc la possibilité d'affecter un tarif différent aux électrons issus du système de stockage. Le champ remplacement du pack batterie est rempli automatiquement d'après la durée de vie indiqué au § III.3.4 et par rapport à la durée d'observation économique du projet. Idem pour la maintenance, son coût est relatif à la technologie de stockage choisi. En ce qui concerne le coût d'achat du pack batterie, il se peut que celui-ci diminue fortement profitant ainsi d'un effet d'échelle (si toutefois les stations de recharges solaires se multiplient sur l'île). Pour exemple le prix du photovoltaïque installé est passé de 10 €/Wc à 3 €/Wc en moins de 5 ans à la Réunion.

Figure 46 : Données économiques concernant le pack batterie tampon

La dernière fenêtre est consacrée au parc de véhicules électriques choisi. Dans notre cas le champ location des batteries s'élève à 79€/mois (Cf. Chapitre 1 § I.5.1). Le nombre de kilomètre parcourus annuellement est automatiquement rempli grâce aux données kilométriques issues des feuilles Excel (Cf. § III.1 de ce chapitre). Les dépenses en terme d'entretien et de maintenance sont de l'ordre de 60% des dépenses pour un parc de véhicules thermiques équivalent (Cf. § I.5.2), ce ratio empirique sur lequel la littérature semble s'accorder pour l'instant est voué à s'affiner dans le temps avec le retour d'expérience des nouveaux véhicules électriques (8). Enfin le coût de l'électricité grise en heure creuse

doit être indiqué car il sera pris en compte lors de la phase de rechargement via le réseau (Cf. § II.4.2 du chapitre 1).

Champ	Valeur
Prix TTC du parc auto [€]	108400
Montant du bonus écologique total [€]	12000
Location des batteries [€/mois]	79
Nombre de km parcourus annuellement par le parc [km/an]	30191.9216
Dépenses entretien & maintenance [€/km]	0.0135
Coût de l'électricité grise pour un tarif vert en heures creuse	3.167

Figure 47 : Données économiques concernant le parc de véhicules électriques

III.5 Données carbone

Les renseignements fournis dans cette partie de l'outil de dimensionnement serviront à effectuer le bilan carbone de notre installation (Cf. § V.1 de ce chapitre). En premier lieu le logiciel demande à l'utilisateur de renseigner les caractéristiques d'un parc de véhicules thermiques équivalent à son parc électrique en termes de gamme de confort. Les données pré remplis de la Figure 48 ci-dessous correspondent aux données fournis au paragraphe 1.5.2. *Equivalent thermique* du chapitre précédent où il est indiqué toutes les caractéristiques d'un parc thermique équivalent dans le cas de notre projet pour la collectivité de Bras-Panon. Les tarifs TTC du Diesel et du Sans Plomb sont ceux en vigueur à la Réunion pour ce trimestre. Les données kilométriques sont issues comme précédemment des feuilles Excel (Cf. § III.1 de ce chapitre). Quant aux dépenses d'entretien et de maintenance des véhicules thermiques, les valeurs ci-dessous sont des valeurs moyennées sur l'ensemble du parc équivalent. Elles sont issues d'un site web dont le principe est de capitaliser et centraliser les informations sur ces dépenses pour le plus grand nombre de modèles de voiture (9). Le dernier champ concerne la Taxe sur les Véhicules de Société, celle-ci est applicable à tous véhicules de tourisme que possèdent les sociétés et ont pour vocation de circuler sur le territoire Français. Cette taxe annuelle est calculée par rapport au rejet de CO₂/km des véhicules ayant été mis en circulation après le 1^{er} janvier 2006. Pour plus d'information consulter l'article 1010 du code des impôts (10). Dans le cas de notre projet, la collectivité de Bras-Panon ne paye pas de TVS sur ses véhicules de tourisme.

Caractéristiques du parc de véhicules thermiques équivalent	
Prix TTC du Diesel [€]:	1.25
Consommation moyenne du parc Diesel [l/100km]:	6.3
Emission de CO2 moyenne du parc Diesel [gCO2/km]	160
Nombre de km parcourus annuellement par le parc Diesel [km/an]:	13508.2888
Dépenses entretien & maintenance parc Diesel [€/km]:	0.0225
Prix TTC du Sans Plomb [€]:	1.58
Consommation moyenne du parc Sans Plomb [l/100km]:	3.5
Emission de CO2 moyenne du parc Sans Plomb [gCO2/km]	90
Nombre de km parcourus annuellement par le parc Sans Plomb [km/an]:	15265.0252
Dépenses entretien & maintenance parc Sans Plomb [€/km]:	0.005
TVS pour l'ensemble du parc auto [€/an]	0

Figure 48 : Caractéristiques du parc de véhicules thermiques équivalent

Afin de réaliser un bilan carbone le plus complet possible, l'outil va prendre en compte les rejets de CO₂ liés à la fabrication des principaux éléments constitutifs de l'installation mais également l'acheminement de ces éléments jusqu'au lieu d'installation. On peut voir cette étape en quelque sorte comme une analyse de cycle de vie (ACV) du projet mais centrée uniquement sur les émissions de gaz carbonique. Si l'on se focalise uniquement sur l'aspect transport de notre projet, on parle alors d'analyse des émissions du « puits à la roue » (Cf. Chap.1 § I.2). Les deux premiers champs de la Figure 49 ci-dessous représentent respectivement la teneur en CO₂ des kWh produits en métropole (11) et sur l'île de la Réunion (12). Les champs suivants concerne l'énergie grise qu'il a fallu consommer afin de fabriquer 1 kWhc photovoltaïque (13) (14) ou encore 1 kWh de stockage au plomb (15). Vient ensuite la prévision de quantité de carburant consommée durant les 20 années de roulage du projet, cette quantité est automatiquement calculée par le logiciel en combinant les données kilométriques et les caractéristiques du parc de véhicules thermiques équivalent (Figure 48). Enfin les derniers champs concernent les données relatives au fret du matériel nécessaire au projet, celui-ci se fait principalement par voie maritime. Pour ce qui est des carburants à la Réunion, l'importation se fait principalement depuis Singapour. Les distances de fret sont calculées via un site web très utilisé dans le monde des transports maritimes (16). L'estimation du tonnage et du volume de la marchandise sont également des champs à ne pas négliger afin que le bilan carbone soit le plus juste possible.

Paramètre	Valeur
Rejets CO2 réseau île de la Réunion [gCO2/kWh]	815
Rejets CO2 réseau Métropole [gCO2/kWh]	90
Bilan énergie grise pour la fabrication d'un panneau PV [kWh/kWh]	2525
Bilan énergie grise pour la fabrication d'une batterie au Plomb [kWh/kWh]	0.25
Quantité de diesel consommée sur la durée du projet [L]	17020.4439
Quantité de SP 95 consommée sur la durée du projet [L]	10685.5176
Masse volumique moyenne du carburant [t/m3]	0.8
Distance parcouru par le carburant depuis Singapour [km]	8000
Masse de la marchandise à importer (PV + Batt + Ond) [t]	3.69
Volume de la marchandise à importer [m3]	5
Distance parcouru par la marchandise depuis la métropole [km]	16000
Capacité de transport du porte-conteneurs (ne pas modifier) [evp]	500

Figure 49 : Données relatives aux émissions carbonées

IV. CŒUR DU MODELE DE CALCUL

Cette partie a pour but d'explicitier la conception de l'outil de manière très simple sans rentrer dans les détails du langage de programmation Matlab. Il est important de bien saisir le raisonnement de calcul de l'outil afin de pouvoir par la suite interpréter les résultats avec un certain détachement critique.

IV.1 Le kWh : une grandeur clé

L'intégralité des opérations contenus dans le code du logiciel ont vocation à manipuler des kWh, en effet cette unité est celle qui est utilisée afin de mesurer la quantité d'énergie électrique transitant à travers les nombreux sous systèmes de la station de recharge solaire. A l'instar des véhicules thermiques les véhicules électriques possèdent une jauge afin d'évaluer le nombre de kilomètre à parcourir avant de faire le « plein », cette autonomie restante se traduit par la quantité d'énergie présente au sein de la batterie du véhicule électrique. Cette quantité d'énergie se mesure en kWh, par abus de langage on parle alors de capacité (terme qui en réalité à pour unité exacte l'Ampère heure). Les besoins de recharge des véhicules vont donc s'exprimer en kWh tout comme la production d'énergie issue des panneaux photovoltaïques.

IV.2 Blocs d'imbrication

Le logiciel a été conçu pour effectuer de nombreuses simulations et un seul paramétrage de l'utilisateur. En effet les champs « incrémentation » présents dans de nombreuses fenêtres de saisie des données (Cf. § III.3) vont permettre à l'utilisateur aussi bien de balayer une large gamme de dimensionnement que d'affiner un dimensionnement au kWc prêt. Ce balayage est rendu possible par l'outil en intégrant les calculs dans des boucles imbriquées les unes dans les autres. Ces boucles en question sont aux nombres de 4 :

- ✓ 1^{ère} boucle : variation de la puissance crête photovoltaïque
- ✓ 2^{ème} boucle : variation de la capacité des batteries tampon
- ✓ 3^{ème} boucle : variation de l'énergie dédiée au peak shaving
- ✓ 4^{ème} boucle : variation de la part de subventions obtenues

Ces boucles étant imbriquées, le logiciel ne sortira pas d'une boucle avant d'avoir balayé toutes les incrémentations spécifiées par l'utilisateur pour cette boucle. Ce n'est qu'après ce balayage que le logiciel va remonter à la boucle n-1 pour de nouveau balayer toutes les incrémentations relatives à cette boucle. Cela peut paraître un peu abstrait dans une explication théorique mais lors de l'utilisation du logiciel l'utilisateur saisi instantanément ce principe de boucle imbriquées. Plus particulièrement lors de l'affichage des résultats synthétiques :

Eco_Plom_15kWh_8kWc_0%Peak Shaving
Eco_Plom_15kWh_8kWc_5%Peak Shaving
Eco_Plom_15kWh_8kWc_10%Peak Shaving
Eco_Plom_25kWh_8kWc_0%Peak Shaving
Eco_Plom_25kWh_8kWc_5%Peak Shaving
Eco_Plom_25kWh_8kWc_10%Peak Shaving
Eco_Plom_35kWh_8kWc_0%Peak Shaving
Eco_Plom_35kWh_8kWc_5%Peak Shaving
Eco_Plom_35kWh_8kWc_10%Peak Shaving
Eco_Plom_15kWh_10kWc_0%Peak Shaving
Eco_Plom_15kWh_10kWc_5%Peak Shaving
Eco_Plom_15kWh_10kWc_10%Peak Shaving
Eco_Plom_25kWh_10kWc_0%Peak Shaving
Eco_Plom_25kWh_10kWc_5%Peak Shaving
Eco_Plom_25kWh_10kWc_10%Peak Shaving
Eco_Plom_35kWh_10kWc_0%Peak Shaving
Eco_Plom_35kWh_10kWc_5%Peak Shaving
Eco_Plom_35kWh_10kWc_10%Peak Shaving
Eco_Plom_15kWh_12kWc_0%Peak Shaving
Eco_Plom_15kWh_12kWc_5%Peak Shaving
Eco_Plom_15kWh_12kWc_10%Peak Shaving
Eco_Plom_25kWh_12kWc_0%Peak Shaving
Eco_Plom_25kWh_12kWc_5%Peak Shaving
Eco_Plom_25kWh_12kWc_10%Peak Shaving

Tableau 3 : Différentes configuration de dimensionnement issu d'un seul paramétrage de l'utilisateur

On remarquera que la 4^{ème} boucle n'est pas présente dans ce tableau récapitulatif, pour cause cette 4^{ème} boucle à une influence sur le business plan et non sur le bilan carbone globale de l'installation. Elle fera donc son apparition lors des calculs économiques. Sur le Tableau 3 ci-dessus, on peut voir que l'utilisateur a sollicité l'outil afin de balayer un large spectre de valeurs : de 8 à 12 kWc (3 incréments), 15 à 35 kWh (3 incréments) et de 0 à 10% de Peak Shaving (3 également). Le nombre de simulations au total peut être calculé en multipliant la somme des incréments présent dans chaque boucle, ici $3 \times 3 \times 3 = 27$ simulations. L'étude complète de bilan carbone ainsi que le business plan seront calculés pour chacune de ces simulations différentes. Dès lors on mesure l'ampleur de la puissance d'un tel outil par rapport à une simple feuille Excel (Cf. § II). Il est à noter que la plupart des postes informatiques classique ne peuvent supporter plus d'une trentaine de simulations avec un seul paramétrage, en effet dans ce cas la mémoire virtuelle vient à manquer. Ce problème peut être pallié grâce à l'utilisation d'une machine conçu spécifiquement pour le calcul et possédant assez de mémoire virtuelle.

IV.3 Définition des variables

Les principales variables qui entre en compte dans le cœur du modèle de calcul sont exprimées en kWh :

- ✓ Besoins de recharge des véhicules
- ✓ Production PV
- ✓ Energie contenu dans les batteries tampon le matin
- ✓ Energie contenu dans les batteries tampon après la recharge PV
- ✓ Energie injectée au réseau hors créneau Peak Shaving
- ✓ Energie injectée au réseau Peak Shaving
- ✓ Energie contenu dans les batteries tampon après la recharge des VE
- ✓ Energie contenu dans les VE après recharge
- ✓ Energie pompée du réseau pour la recharge VE

Il est important de préciser que les bilans énergétiques sont effectués jour par jour pour les 365 jours de données d'ensoleillement. Lors des calculs la plupart de ces variables sont multipliées par des facteurs inférieurs à 1, ces facteurs correspondent aux rendements respectifs des différents sous systèmes de l'installation. Ainsi les flux d'énergie au sein du système sont pondérés par ces rendements énergétiques plus ou moins bon selon les technologies employées. On comprend aisément que ces rendements sont extrêmement importants puisque par exemple dans le cas des batteries tampon, quasiment la totalité des flux énergétiques transitent par ce sous système. Dans notre cas, la technologie Plomb tubulaire possède un rendement énergétique de 75% sur un cycle de charge décharge.

IV.4 Enregistrement des résultats

L'outil tel qui l'a été créé est capable d'enregistrer l'ensemble des graphiques générés « on the fly » pour chaque simulations et ce en deux formats bien distincts :

- ✓ Un premier format *.bmp qui correspond à une simple image vectorielle que l'on pourra insérer dans un rapport par exemple.
- ✓ Un deuxième format *.fig qui est un format propriétaire de Matlab qui permet à l'utilisateur de modifier l'ensemble des propriétés du graphique et également d'utiliser la fonction zoom offerte par Matlab.

Par ailleurs ces formats sont enregistrés selon une arborescence Windows bien définie ce qui permet à l'utilisateur de s'y retrouver lors de la consultation post-simulation. Les résultats chiffrés sont quant à eux centralisés dans 4 feuilles Excel différentes que le logiciel va générer automatiquement à la fin de l'ensemble des simulations :

- ✓ Un fichier contenant les résultats brut en termes de flux de kWh au travers les différents organes de l'installation
- ✓ Un fichier contenant des statistiques sur ces résultats brut afin d'avoir une vue de l'ensemble des simulations
- ✓ Un fichier contenant l'analyse carbone complète des simulations
- ✓ Un dernier fichier contenant les résultats de l'analyse économique

Le dépouillement de ces fichiers va permettre à l'utilisateur de choisir le dimensionnement de son système en fonction du bilan carbone cible tout en tenant compte des données économiques.

V. VISUALISATION DES RESULTATS

V.1 Bilan carbone

Dans un projet comme celui-ci où les émissions carbones liées aux déplacements sont au centre de toutes les attentions, il apparait important que l'outil de simulation développé puisse effectuer un bilan carbone sur la globalité du projet. Dans le jargon cela s'appelle un bilan carbone du « puits à la roue » ou encore « well to wheel », cela consiste à prendre en compte deux types d'émissions :

- ✓ Les émissions liées au roulage des véhicules : émissions du « réservoir à la roue » ou « tank to wheel »
- ✓ Les émissions liées à la production de l'énergie nécessaire au remplissage des réservoirs de ces mêmes véhicules : émissions du « puits au réservoir » ou « well to tank ».

L'objectif de cette partie est de présenter les capacités de l'outil à produire des résultats pertinents en termes de bilan carbone de l'installation. Une partie est également consacrée au bilan d'énergie grise lié au projet.

V.1.1 Tank to Wheel

Le bilan carbone tank to wheel des véhicules électriques est tout simplement nulle (Cf. Figure 50) puisque de part leur conception les véhicules électriques ne rejettent aucun gaz, en effet les réactions électrochimiques qui se produisent au sein d'une batterie n'engendrent absolument aucun dégagement de gaz carbonique. En revanche pour les véhicules thermiques équivalent à notre parc VE, le bilan est bien plus élevé : 132 gCO₂/km (Cf. § 1.5.2).

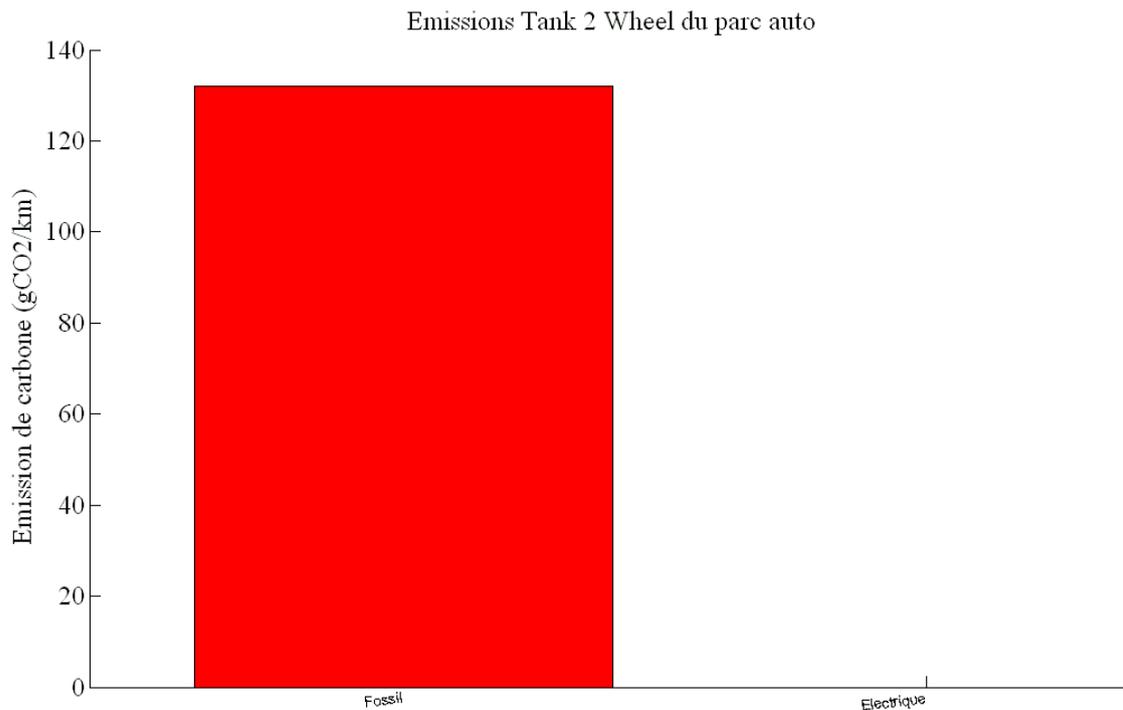


Figure 50 : Comparaison entre le parc VE et le parc thermique des émissions du réservoir à la roue

V.1.2 Well to tank

Ce bilan carbone du puits au réservoir est plus que difficile à établir pour les véhicules thermiques, cela est due en partie au manque de communication des compagnies pétrolières. En effet les émissions exactes de CO₂ émanant de la production d'essence ou de gas-oil sont des données plus que confidentielles. Néanmoins les informations présentes sur la toile convergent toutes vers un seul chiffre : les émissions carbone liées à la production d'essence sont de l'ordre de 17% des émissions du réservoir à la roue (18). Dans notre cas cela correspondrai à 22 gCO₂ de plus par kilomètre parcouru par le véhicule.

En ce qui concerne les véhicules électriques ce bilan est beaucoup plus précis puisqu'il est issu d'un calcul que l'on peut expliciter. Ce calcul est très simple, grâce au cœur de calcul de l'outil nous connaissons le nombre de kWh issus du réseau et à destination des véhicules au jour le jour. Nous connaissons également le contenu carbone de ces électrons issus du réseau (Cf. chapitre 1 § I.2). Une simple division permet d'obtenir le bilan carbone du parc auto au jour le jour, ce bilan est ensuite moyenné sur l'année afin d'obtenir le bilan carbone du puits au réservoir. La Figure 51 ci-dessous représente les flux annuel de kWh injectés et soutirés du réseau avec également le bilan carbone au jour le jour.

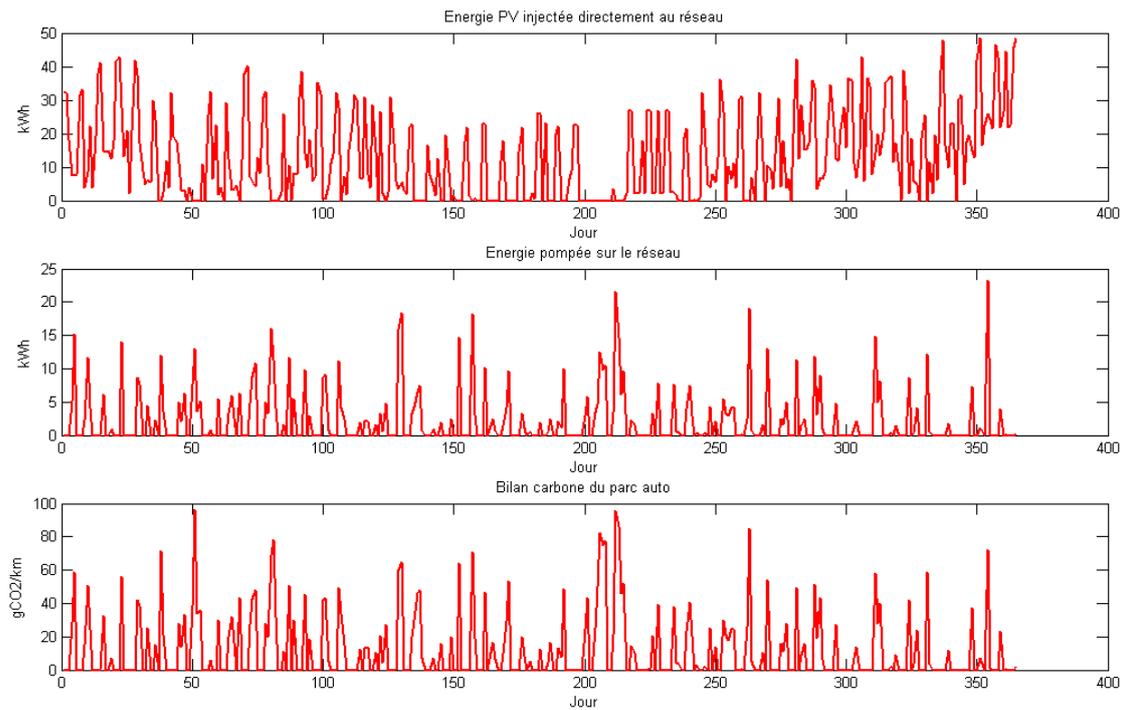


Figure 51 : Représentation des flux réseau et du bilan carbone qui en découle

Le bilan carbone moyenné apparaît par la suite dans un fichier Excel auto-généré par l'outil de dimensionnement (Cf Tableau 4 ci-dessous). A chaque simulation correspondant à une configuration du système différente (colonne de gauche), l'outil calcul le bilan carbone du parc auto (colonne de droite).

Configuration du système	Moyenne gCO2/km
Eco_Plom_15kWh_8kWc_0%Peak Shaving	43,28422348
Eco_Plom_25kWh_8kWc_0%Peak Shaving	22,21658876
Eco_Plom_35kWh_8kWc_0%Peak Shaving	13,24380767
Eco_Plom_15kWh_10kWc_0%Peak Shaving	43,01385045
Eco_Plom_25kWh_10kWc_0%Peak Shaving	20,5766897
Eco_Plom_35kWh_10kWc_0%Peak Shaving	8,963627437
Eco_Plom_15kWh_12kWc_0%Peak Shaving	42,79171976
Eco_Plom_25kWh_12kWc_0%Peak Shaving	20,00484949
Eco_Plom_35kWh_12kWc_0%Peak Shaving	7,036454857

Tableau 4 : Bilan carbone well to tank pour différentes simulations

V.1.3 Well to wheel

Ce dernier bilan n'est en réalité que la somme des deux précédents, on ajoute les bilans du puits au réservoir et du réservoir à la roue et on obtient le bilan carbone réel des véhicules. Bien évidemment pour toutes les simulations, le logiciel nous calcul cette somme et produit un graphique afin de pouvoir comparer les émissions selon les configurations du système (Cf Figure 52). Sur la figure ci-dessous on voit par exemple qu'avec un système de 10kWc PV et 30kWh de capacité de stockage on arrive à diviser par 15 les émissions carbonées well to wheel !

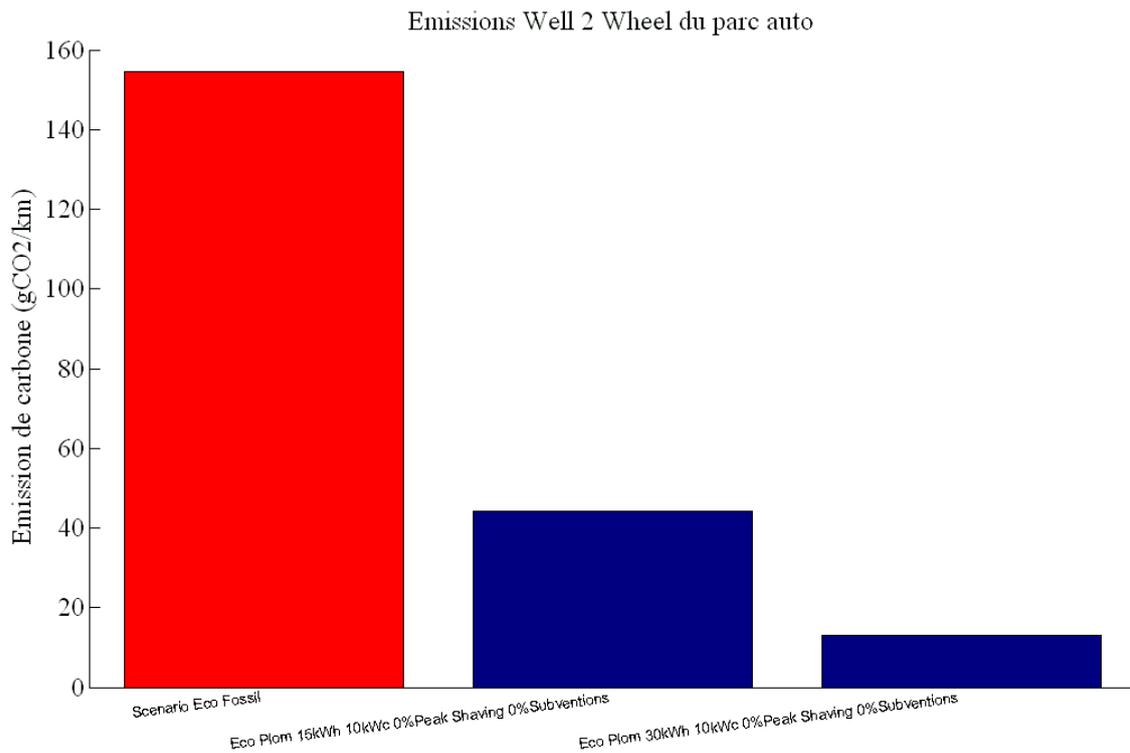


Figure 52 : Emissions du puits au réservoir pour plusieurs cas de dimensionnement

Pour rappel l'objectif que nous nous sommes fixé pour notre installation est un bilan carbone well to wheel de 10gCO₂/km (Cf. § I de ce chapitre). A l'issu de plusieurs simulations avec l'outil, il apparait que la configuration qui permet d'atteindre notre objectif se compose d'une installation photovoltaïque d'une puissance de 10 kWc et d'un parc batterie d'une capacité de 32 kWh.

V.1.4 Energie grise

Il n'est pas rare d'entendre les opposants au photovoltaïque évoquer l'argument de la conception des panneaux qui selon eux consommeraient plus d'énergie qu'ils ne vont en produire par la suite. Afin d'anticiper ce genre de réaction de la part d'éventuels opposant au projet, l'outil intègre un calcul de l'énergie grise nécessaire à la conception et la fabrication d'une telle station de recharge solaire. Le transport du matériel est également pris en compte dans le calcul final. Le Tableau 5 ci-dessous présente les résultats pour plusieurs configurations de systèmes :

Configuration du système	Bilan CO ₂ du projet incluant énergie grise et fret de la marchandise (tCO ₂)
Eco_Plom_15kWh_8kWc_0%Peak Shaving	9,761035061
Eco_Plom_25kWh_8kWc_0%Peak Shaving	6,954299425
Eco_Plom_35kWh_8kWc_0%Peak Shaving	5,758900664
Eco_Plom_15kWh_10kWc_0%Peak Shaving	9,725014614
Eco_Plom_25kWh_10kWc_0%Peak Shaving	6,735823873
Eco_Plom_35kWh_10kWc_0%Peak Shaving	5,188673653
Eco_Plom_15kWh_12kWc_0%Peak Shaving	9,695421253
Eco_Plom_25kWh_12kWc_0%Peak Shaving	6,65964046
Eco_Plom_35kWh_12kWc_0%Peak Shaving	4,931926086

Tableau 5 : Bilan CO₂ du projet incluant l'énergie grise et le fret de la marchandise

Les résultats sont obtenus grâce aux données carbone (Cf § III.5) entrées par l'utilisateur. Sans rentrer dans le détail des calculs il est important de préciser que le tonnage final de CO₂ obtenu est celui pour la totalité de la durée d'observation économique du projet (ici 20 années) et comprend le bilan well to wheel extrapolé lui aussi sur la durée du projet. Afin de pouvoir comparer ce bilan carbone global, l'outil fourni également dans le fichier Excel le bilan carbone global pour un parc de véhicules thermiques :

Tonnes de CO ₂ sur la durée du projet pour un parc équivalent thermique en tenant compte de l'import du carburant	1268
--	------

La comparaison est flagrante, le bilan CO₂ global est plus de 120 fois supérieure pour un parc de véhicules thermiques par rapport à un parc de véhicules électriques. Le constat est sans équivoque, la combinaison véhicules électriques et station de recharge solaire est une alternative viable aux véhicules thermiques et de surcroît qui est beaucoup moins émettrice de gaz à effet de serre.

V.2 Bilan économique

Les éléments qui vont être fournis par l'outil peuvent aider l'utilisateur dans sa décision, en revanche en aucun cas cette analyse ne doit être prise comptant sans vérification préalable par un économiste. De ce fait le développeur décline toute responsabilité envers les utilisateurs de l'outil économique présenté ici. Il est à noter que ni l'évolution des coûts des énergies fossiles ni l'évolution de la fiscalité en défaveur du fossile dans le futur ne sont pris en compte dans les calculs qui vont suivre. Nous avons fait ce choix car il nous semble déraisonnable de baser notre étude économique sur de simples spéculations du marché des énergies fossiles.

V.2.1 Chiffres clés

Pour chaque séquence de simulation lancée par l'utilisateur, l'outil va générer une succession de graphiques relatifs à l'aspect économique du projet. Ces graphiques sont issus des données d'entrée économiques détaillées au paragraphe III.4 de ce chapitre. Le premier graphique généré concerne les coûts kilométriques, le détail de ces coûts sera abordé par la suite à travers un autre graphique. La Figure 53 ci-dessous nous indique les coûts kilométriques pour un projet sans aucune subvention, un projet avec 50% de subvention et un projet fossile (Cf. § I.5.2). On remarquera que le projet électrique devient viable économiquement par rapport à un projet fossile à la condition qu'il soit subventionné à hauteur de 50% de l'investissement initiale. Sans cela, une flotte de véhicule avec sa station de recharge solaire revient environ deux fois plus chère au kilomètre qu'une flotte de véhicules thermiques.

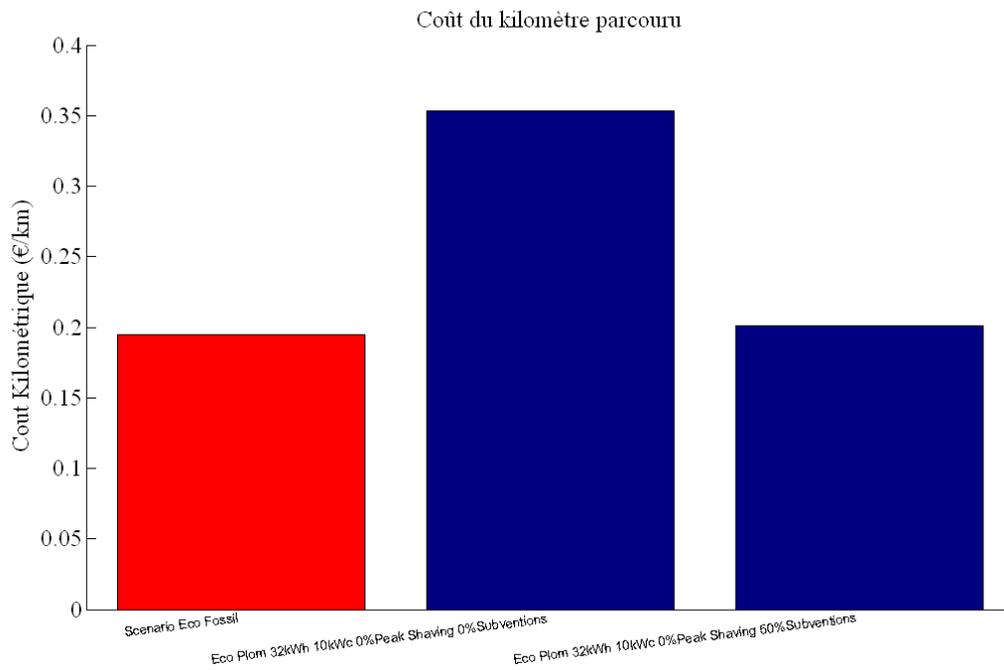


Figure 53 : Comparaison des coûts kilométrique

Afin de visualiser en détail la composition de ces coûts kilométriques, l'outil génère automatiquement un graphique sur lequel on peut distinguer la proportion des différents coûts inhérent à l'acquisition du matériel et à la maintenance de celui-ci. Sur la Figure 54 ci-dessous est représenté le détail des coûts kilométriques pour un projet électrique conforme à l'objectif des 10gCO₂/km et un projet fossile. On remarquera que l'investissement initial pour le projet électrique a une forte répercussion sur les coûts kilométriques. A noter que la location des batteries pour le Renault Kangoo représente à elle seule sur les 20 années de regard économique plus que l'investissement initial lié au système de stockage de l'installation. Par ailleurs la revente de l'électricité photovoltaïque à EDF suffit à couvrir la maintenance globale de l'installation : stockage, photovoltaïque et VE. Ce type de graphique nous apprend beaucoup sur les leviers économiques sur lesquels on peut se permettre d'agir afin de diminuer les coûts d'un tel projet.

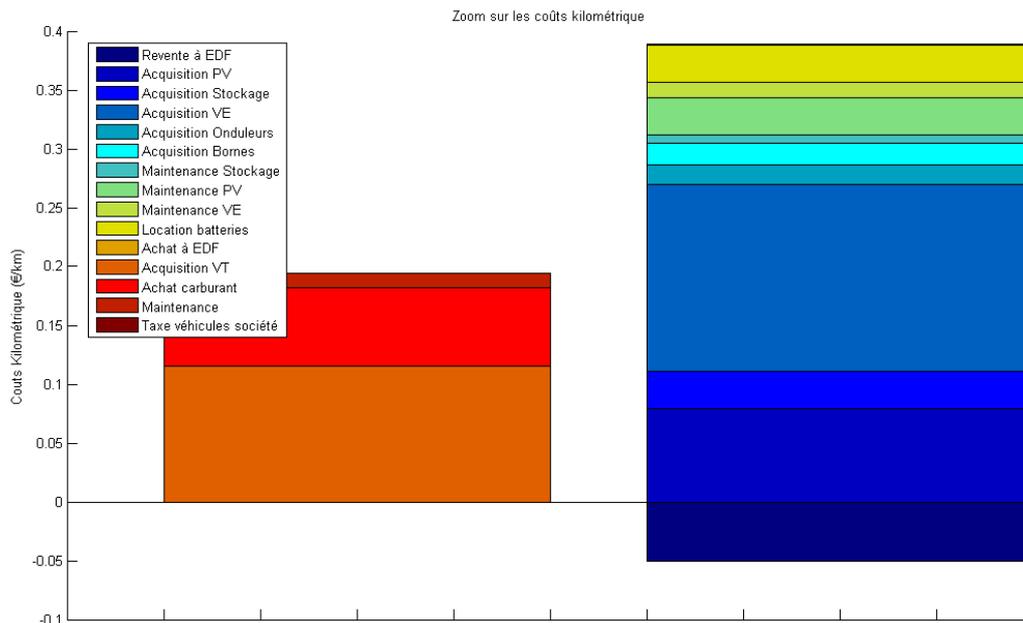


Figure 54 : Détails des coûts kilométriques



Les graphiques suivants portent sur l'analyse des Cash Flows et la comparaison de ces derniers entre scenario fossile et scenario électrique. Dans un premier temps les Cash Flows cumulés sur la durée d'observation économique du projet sont passés en revue pour chaque simulation. La Figure 56 ci-dessous représente ces Cash Flows cumulés et permet d'effectuer la comparaison entre scenario fossile et électrique, les résultats sont bien en accords avec ceux représentés à la Figure 53 : sans subvention le projet électrique revient deux fois plus cher que le projet fossile. Le programme intègre d'ailleurs une fonctionnalité qui permet d'indiquer à l'utilisateur la rentabilité du projet électrique par rapport au fossile sans même avoir à regarder les graphiques :



Figure 55 : Fenêtre pop-up indiquant la rentabilité différentielle du projet

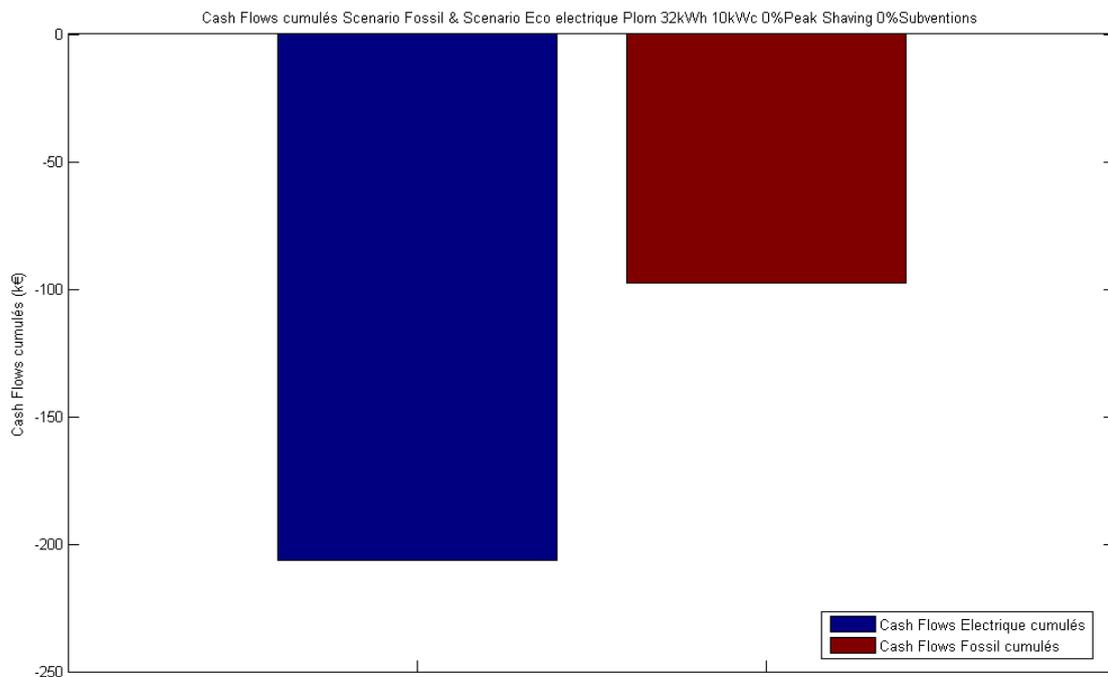


Figure 56 : Cash Flows cumulés sur la durée d'observation économique du projet

Vient ensuite les graphiques détaillant la composition des cash flows annuels aussi bien pour le projet fossile (Figure 57) que pour le projet électrique (Figure 58).

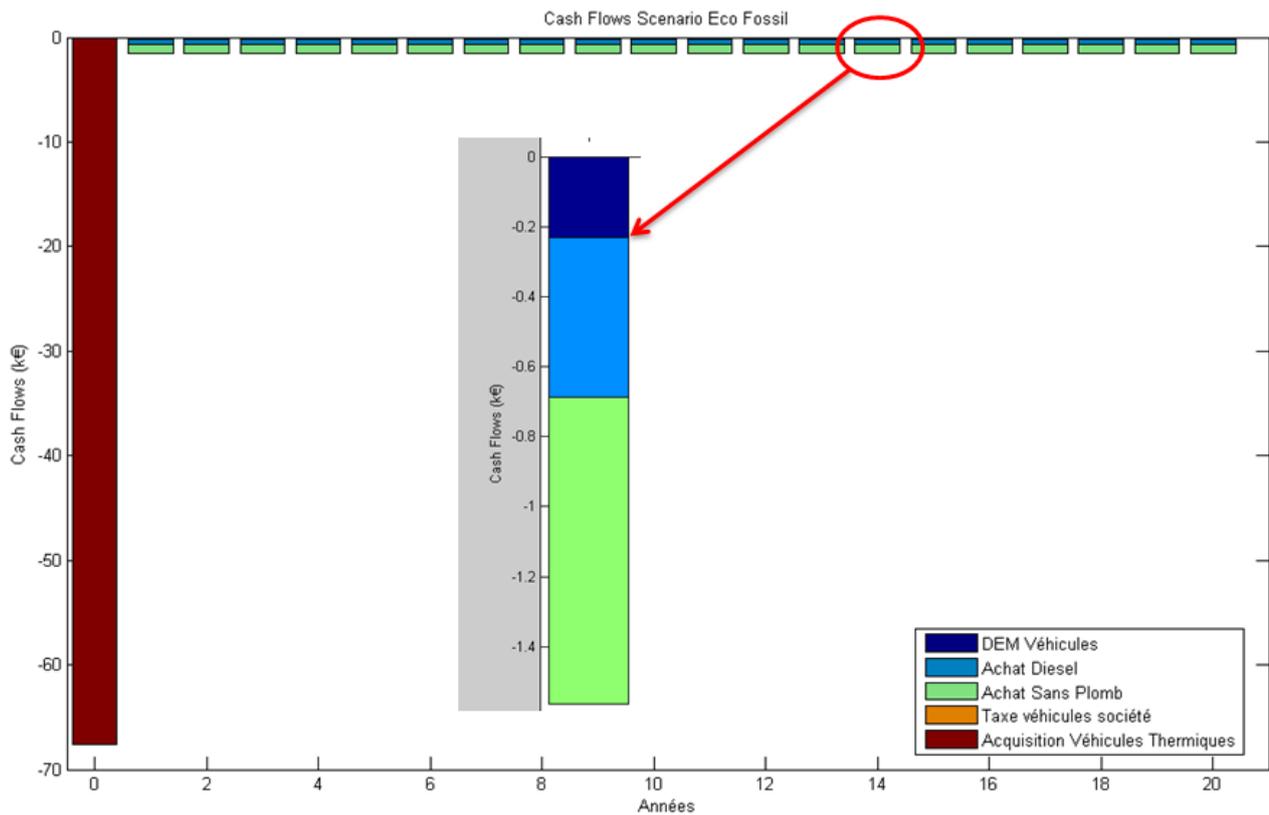


Figure 57 : Détails des cash flows pour le projet fossile équivalent

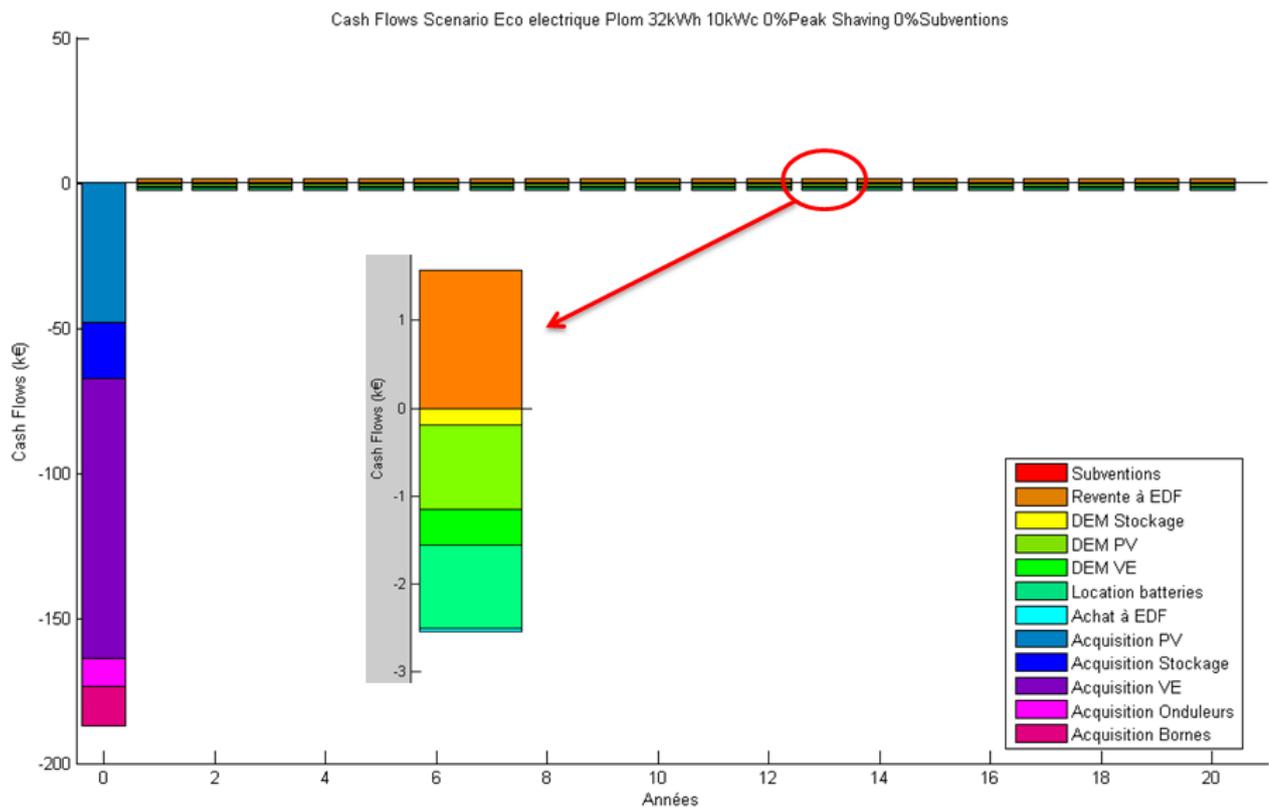


Figure 58 : Détails des cash flows pour le projet électrique qui respecte les objectifs d'émissions carbone fixés

Pour conclure ces graphiques nous donnons une idée globale des leviers et des verrous sur lesquels agir afin de diminuer les coûts aussi bien d'investissement que de maintenance des stations de recharge solaire et des véhicules électriques.

V.2.2 Méthode TEC

Dans cette partie l'analyse économique est abordée d'une façon plus formelle, en effet l'outil de dimensionnement va fournir à l'utilisateur des indicateurs conventionnels tels que la VAN du projet ou encore son Taux d'Enrichissement en Capital (TEC). La méthode TEC qui a été inventé et promu par Mr Chabot est parfaitement adaptée aux projets EnR, son avantage est de pouvoir situer sur une échelle universelle de rentabilité les projets :

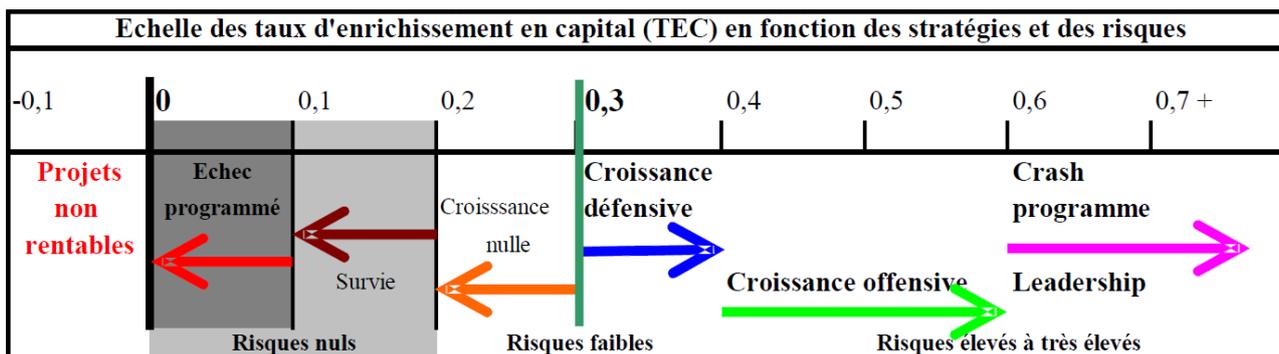


Figure 59 : Echelle des taux d'enrichissement en capital en fonction des stratégies et des risques

Dans notre cas nous verrons par la suite que quelque soit le dimensionnement de la station de recharge solaire, le TEC du projet est toujours négatif car la seule rentrée d'argent est la revente de l'électricité d'origine photovoltaïque à EDF. En effet le jour où rouler avec un quelconque véhicule rapportera de l'argent n'est pas encore venu ! En attendant pour notre cas de figure la méthode de rentabilité différentielle est idoine. Cette méthode consiste simplement à comparer les TEC et VAN des projets fossile et électrique afin de déterminer lequel est le plus rentable par rapport à l'autre. L'outil va générer automatiquement un fichier Excel contenant les indicateurs nécessaires à l'analyse de rentabilité différentielle :

Configuration du système	VAN différentielle	VAN	TEC différentiel	TEC
Eco_Plom_32kWh_10kWc_0%Peak Shaving_50%Subventions	-16802,20	-114612,87	-0,51	-1,11
Eco_Plom_32kWh_10kWc_0%Peak Shaving_51%Subventions	-14931,47	-112742,14	-0,48	-1,12
Eco_Plom_32kWh_10kWc_0%Peak Shaving_52%Subventions	-13060,74	-110871,41	-0,45	-1,12
Eco_Plom_32kWh_10kWc_0%Peak Shaving_53%Subventions	-11190,01	-109000,68	-0,41	-1,12
Eco_Plom_32kWh_10kWc_0%Peak Shaving_54%Subventions	-9319,28	-107129,95	-0,37	-1,12
Eco_Plom_32kWh_10kWc_0%Peak Shaving_55%Subventions	-7448,55	-105259,22	-0,32	-1,13
Eco_Plom_32kWh_10kWc_0%Peak Shaving_56%Subventions	-5577,82	-103388,49	-0,26	-1,13
Eco_Plom_32kWh_10kWc_0%Peak Shaving_57%Subventions	-3707,09	-101517,76	-0,19	-1,13
Eco_Plom_32kWh_10kWc_0%Peak Shaving_58%Subventions	-1836,36	-99647,03	-0,10	-1,13
Eco_Plom_32kWh_10kWc_0%Peak Shaving_59%Subventions	34,37	-97776,30	0,00	-1,14
Eco_Plom_32kWh_10kWc_0%Peak Shaving_60%Subventions	1905,10	-95905,57	0,14	-1,14
Eco_Plom_32kWh_10kWc_0%Peak Shaving_61%Subventions	3775,83	-94034,84	0,31	-1,14
Eco_Plom_32kWh_10kWc_0%Peak Shaving_62%Subventions	5646,56	-92164,11	0,55	-1,15
Eco_Plom_32kWh_10kWc_0%Peak Shaving_63%Subventions	7517,29	-90293,38	0,89	-1,15
Eco_Plom_32kWh_10kWc_0%Peak Shaving_64%Subventions	9388,02	-88422,65	1,44	-1,15
Eco_Plom_32kWh_10kWc_0%Peak Shaving_65%Subventions	11258,75	-86551,92	2,41	-1,16

Tableau 6 : Analyse économique pour différentes configurations du système



On constate que pour le projet respectant l'objectif des 10gCO₂/km, la rentabilité différentielle par rapport à un projet fossile est atteinte pour exactement **59%** de subventions. En effet le TEC différentiel s'annule pour cette valeur et la VAN différentielle devient positive. Comme indiqué précédemment le TEC et la VAN restent eux négatifs ce qui indique que le projet ne permet en aucun cas de rapporter de l'argent à son propriétaire. En plus de ce tableau Excel, l'outil génère un graphique qui permet de bien visualiser le point de rentabilité différentielle :

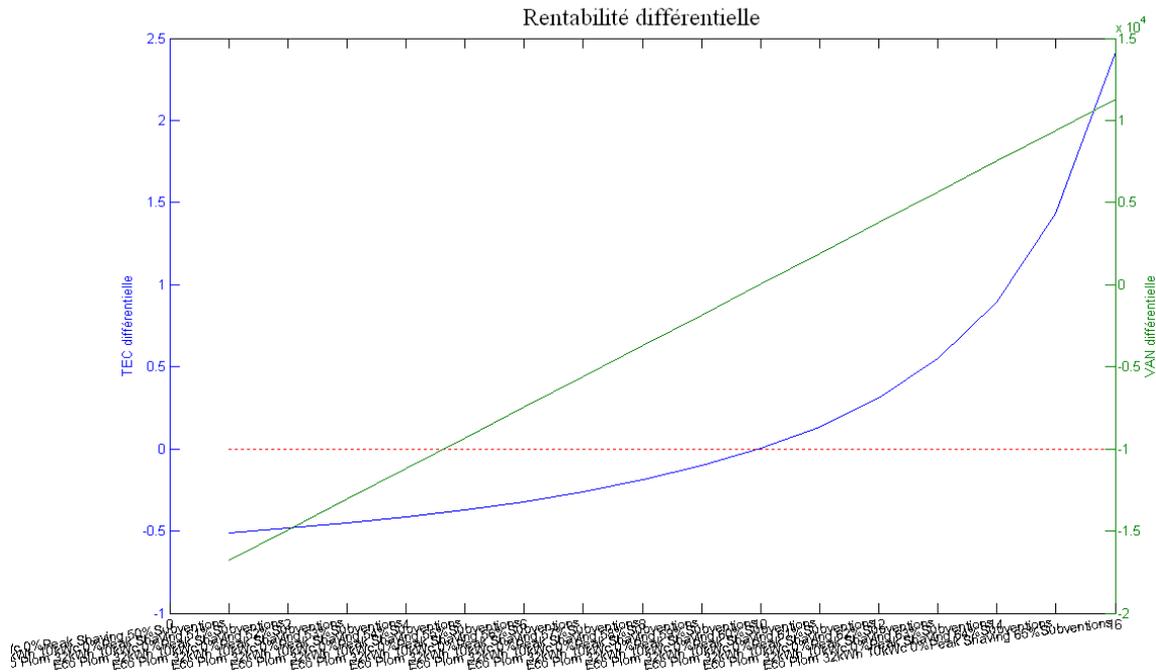


Figure 60 : Rentabilité différentielle

CHAPITRE 3 : LANCEMENT DU PROJET

L'objectif de ce chapitre est de retracer en détails les principaux jalons qui ont contribué au lancement de ce projet et ce qu'ils aient été atteints ou non. Certains de ces jalons ont des échéances au-delà de la fin de ma mission à l'ARER, c'est pourquoi un calendrier prévisionnel a été élaboré en collaboration avec Mr J. Laplanche qui sera chargé du suivi du projet après mon départ de l'ARER.

I. IMPLANTATION

En accord avec Mr le Maire de Bras-Panon et son directeur générale des services Mr Legendre, l'implantation de la station de recharge solaire se fera dans l'enceinte close de la mairie pour des raisons de sécurité. Pour situer les bâtiments présents sur la Figure 61 par rapport aux autres bâtiments du champ de foire, veuillez vous reporter à l'Annexe A. Les panneaux solaires seront donc installés sur le toit de la salle polyvalente comme indiqué sur la Figure 61 ci-dessous, le local à onduleur et batterie sera installé dans l'enceinte de maintenance des véhicules et les bornes et recharge ainsi que les véhicules électriques dans la cour intérieure. Le point de raccordement à la ligne basse tension indiqué par une croix rouge dans la figure ci-dessous est facilement accessible et située à une trentaine de mètre environ du toit de la salle polyvalente. L'orientation des panneaux est quasi idéale : Nord-Ouest, l'inclinaison de l'ordre de 15° est également bonne. Il n'y a aucun masque proche puisque la salle polyvalente est le plus haut bâtiment de la mairie. En ce qui concerne les masques lointains, leur incidence sur la production PV est négligeable (17).

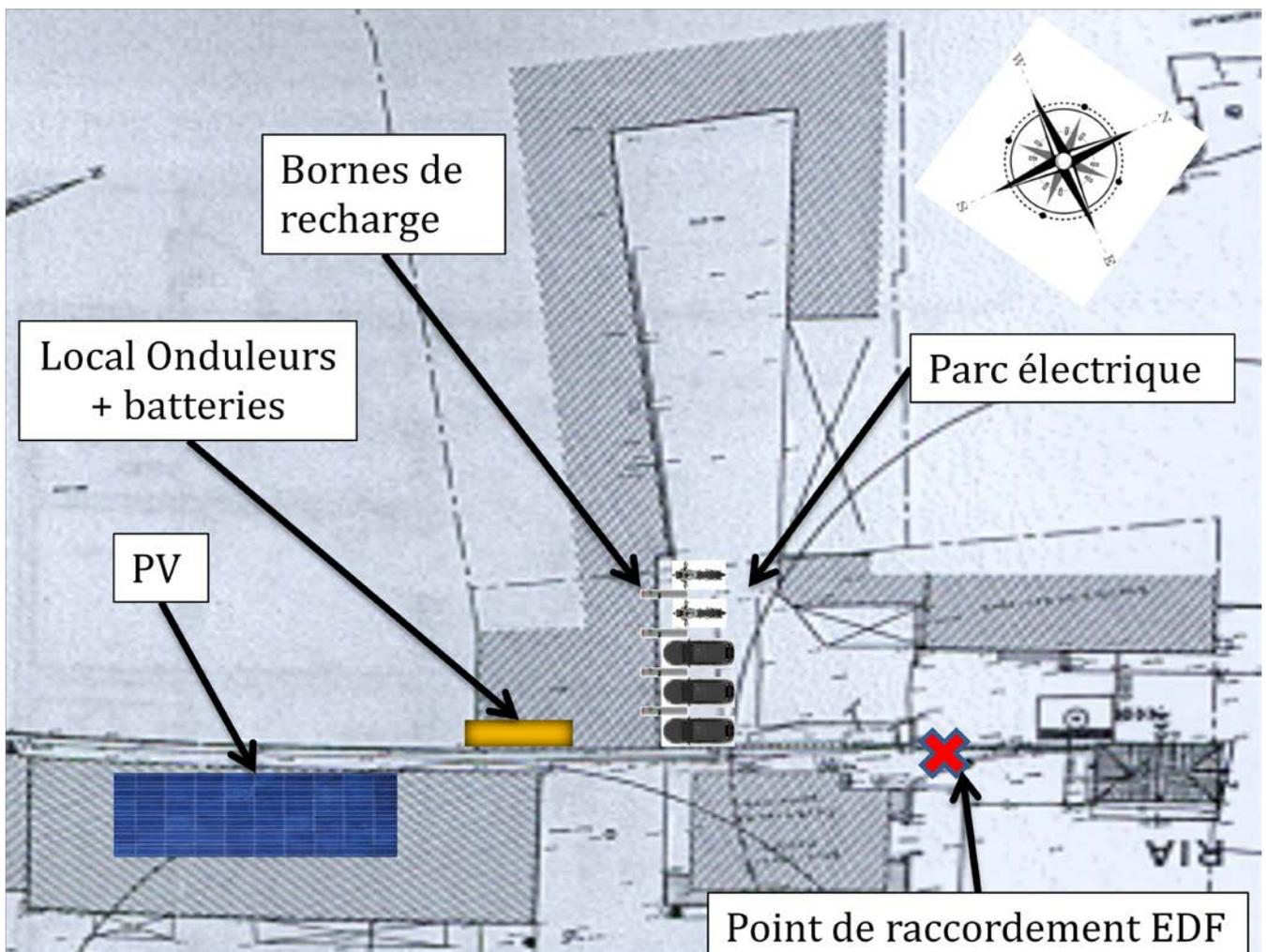


Figure 61 : Plan de masse d'implantation du système sur le champ de foire de la commune de Bras-Panon.

II. ASPECTS JURIDIQUES

Dans le cadre de notre projet plusieurs questions relevant du juridique ont été soulevées. En effet ce type d'installation étant que très peu répandu en France, il n'y a encore aucun cadrage juridique précis. Cela conduit pour certaines questions à des vides juridiques et bien souvent la réponse nait de l'interprétation de la loi et non de sa lecture.

II.1 Autoconsommation ?

La recharge des véhicules électriques via les batteries tampon ou directement via les panneaux photovoltaïques semble relever de l'autoconsommation dans le jargon des installations électriques. En effet d'après la réglementation en vigueur (18), le producteur d'énergie a le choix entre trois options :

- ✓ Auto consommer la totalité de l'énergie produite,
- ✓ vendre le surplus de production d'énergie non consommée,
- ✓ vendre la totalité de sa production.

Il est important de retenir que ce choix doit s'effectuer lors de la connexion du système au réseau car il déterminera la nature du contrat passé avec le gestionnaire du réseau (ERDF ou une ELD : entreprise locale de distribution), dans le cas où il choisirait l'une des deux dernières options. Ces contrats engagent le producteur pour 15 ou 20 ans, selon la puissance de l'installation.

En effet, les installations d'une puissance installée inférieure ou égale à 12MW utilisant l'énergie radiative du soleil font l'objet d'un contrat de rachat de l'électricité d'une durée de 20 ans, à l'inverse de celles d'une puissance inférieure ou égale à 36kVA, qui font l'objet d'un contrat d'une durée de 15 ans (19).

Le producteur d'électricité a donc le choix entre trois options pour l'utilisation de sa production : l'autoconsommation, la vente de l'énergie non consommée, ou la vente de la totalité de sa production. Il s'agit d'un choix que le producteur d'électricité est libre de prendre, et ne peut donc en aucun cas y être contraint. Les contrats EDF ne peuvent que prévoir l'un ou l'autre de ces choix, proposant des contrats type rédigés par l'Etat.

II.2 Tarifs de rachat ?

II.2.1 Electrons photovoltaïques

Une différence de régime juridique existe selon la puissance crête de l'installation photovoltaïque. Cette puissance détermine notamment les tarifs d'achat de l'électricité, la forme des demandes de raccordement, ainsi que les seuils pour l'intégration au bâti. Pour une représentation plus visuelle de l'organigramme des tarifs de rachat de l'électricité photovoltaïque en fonction des critères évoqués précédemment, consulter l'Annexe C.

Un arrêté est applicable aux installations dont la puissance est inférieure ou égale à 36kVA et dont l'électricité n'est pas produite à partir d'un système de stockage. Il s'agit de l'arrêté du 13 mars 2002

[18] « fixant les conditions d'achat de l'électricité produite par les installations d'une puissance inférieure ou égale à 36kVA pouvant bénéficier de l'obligation d'achat ».

Quant à l'arrêté du 4 mars 2011 [19], il fixe les conditions d'achat de l'électricité produite par les installations utilisant l'énergie radiative du soleil d'une puissance inférieure ou égale à 12MW.

Le premier prend soin de préciser que « s'il existe un arrêté tarifaire particulier applicable à l'installation concernée, le producteur a le choix entre ledit arrêté et le présent arrêté ».

On en déduit que l'on a la possibilité d'être éligible à l'arrêté du 4 mars 2011 et de facto de bénéficier de l'obligation d'achat et du tarif associé pour notre station de recharge solaire.

II.2.2 Electrons électrochimiques

On appelle électrons électrochimiques les électrons issus du système de stockage tampon. Comme indiqué au paragraphe II.3.2 du chapitre 1, il existe une phase de fonctionnement dans notre système qui permet d'injecter de l'énergie sur le réseau à partir des batteries tampon. Nous avons évoqué le fait que cette phase se faisait au détriment financier du propriétaire de l'installation, en effet cette injection d'énergie aux heures de pointe augmente le cyclage des batteries tampon dans le seul intérêt du gestionnaire de réseau. Après étude des textes de lois, non seulement le tarif de rachat n'est pas majoré en période de pointe mais en plus de cela il est inférieure au tarif de rachat contractualisé pour l'installation photovoltaïque. En effet les textes excluent explicitement de leur champ d'application les installations produisant de l'électricité à partir d'un système de stockage [19]. Un tarif dédié uniquement aux électrons électrochimiques ne serait possible que dans le cas d'un appel d'offres visant explicitement ce type d'installation, tel que le disposent l'article 8 de la loi du 10 février 2000 ainsi que le décret du 4 décembre 2002. Concrètement l'énergie consacrée au peak shaving par le système est rachetée au prix de l'électricité normale soit environ 8 c€/kWh ce qui est dérisoire par rapport son coût de production et à l'impact positif pour le gestionnaire de réseau.

II.2.3 Déconnexion ?

D'après l'article 22 de l'arrêté du 23 avril 2008 [18], « toute installation de production dont la puissance P_{max} est supérieure ou égale à 3 kVA et mettant en œuvre de l'énergie fatale à caractère aléatoire telles les fermes éoliennes et les installations photovoltaïques peut être déconnectée du réseau public de distribution d'électricité à la demande du gestionnaire de ce réseau lorsque ce dernier constate que la somme des puissances actives injectées par de telles installations atteint 30 % de la puissance active totale transitant sur le réseau. Les circonstances dans lesquelles ces déconnexions peuvent être demandées sont précisées dans la convention de raccordement et les modalités selon lesquelles elles sont effectuées le sont dans la convention d'exploitation ».

La puissance photovoltaïque de notre station de recharge solaire est bien supérieure à 3 kVA, par ailleurs le réseau public de distribution d'électricité de la Réunion devrait atteindre le seuil fatidique des 30% de puissance active liée aux énergies fatales d'ici à 2012. En conséquence, d'après l'article 22 de l'arrêté du 23 avril 2008, notre installation peut être soumise à déconnexion.

III. SUBVENTIONS

III.1 Appel à manifestation d'intérêt de l'ADEME

Dans le cadre des Investissements d'Avenir, l'Etat a confié à l'ADEME une enveloppe de 1 milliard d'euros ainsi que le rôle d'opérateur du programme « véhicule du futur » (21). L'ADEME a concrétisé les attentes de l'état à travers le lancement d'un appel à manifestation d'intérêt le 16 février 2011. Plus précisément, cet AMI vise à « *soutenir les expérimentations nécessaires à la définition des besoins réels et à la validation des innovations technologiques, en anticipant les évolutions à long terme du système véhicule-infrastructure-réseau* » (19). D'un point de vue des subventions, il est clairement indiqué que les projets retenus se verront subventionnés à hauteur de 40% de leur investissement initial ce qui est loin d'être négligeable. Dans le cadre de notre projet de transport solaire, une opportunité de rapprochement avec le consortium VERT (Renault, Tenesol, Schneider, GE, EDF) s'est présentée vers la fin du mois de mai 2011. Concrètement cette opportunité consistait à intégrer notre projet de transport solaire, dont le propriétaire est la collectivité de Bras-Panon, au dossier de réponse de l'AMI déjà constitué par ce consortium VERT. Ce projet VERT (Véhicules Électriques pour une Réunion Technologique) présenté en Annexe K consiste à implanter plusieurs dizaines de stations de recharge sur l'île afin de tester 150 véhicules électriques Renault et ce pendant plusieurs années. Par ailleurs ce projet de grande envergure fait partie intégrante du plan GERRI qui vise une autonomie énergétique de l'île à l'horizon 2030. Grâce à une concertation rapide au sein de l'ARER et avec la collectivité de Bras-Panon, nous avons été en mesure de fournir les documents (dans les délais et dument signés par Mr le Maire) nécessaires à l'intégration de notre projet à la réponse du consortium VERT à l'AMI, la dead line étant fixée par l'ADEME au 14 juin 2011. Malheureusement après une délibération du consortium VERT, notre projet n'a pas été inclus dans leur réponse. L'aspect positif à retenir est le rapprochement de l'ARER avec des géants de l'industrie tels que Tenesol Océan Indien qui de part leur expérience ont été à même de nous apporter un regard extérieur professionnel sur notre projet de transport solaire, cela à été d'autant plus bénéfique que ce rapprochement s'est effectué à un moment du projet où des choix technologiques devaient impérativement se faire.

III.2 Appel à projet de la Région

A la suite de l'échec du rapprochement du consortium VERT, nous nous sommes tournés vers le conseil Régional afin de connaître les possibilités de subventions. La Région étant à l'origine de la dynamique impulsée aux transports propres, notre projet a été bien accueilli. En revanche dans un souci d'équité par rapport aux autres collectivités de l'île, il apparaît que des subventions versées directement à Bras-Panon ne sont pas envisageable sans passer par le cadre d'un appel à projet d'envergure régionale. La Région s'est donc engagée à rédiger un appel à projet qui serait lancé courant septembre. Le montant des subventions n'a pas encore été arrêté définitivement mais une première estimation de 250 k€ à répartir sur 2 à 3 projets semble cohérente. Cette perspective est très importante car à l'issu des réunions avec les élus de la commune de Bras-Panon et en concertation avec les budgets 2011 de la mairie, il s'avère que le projet de station de recharge solaire pourrait se concrétiser si et seulement si celui-ci est subventionné à hauteur de 50% de son l'investissement initial soit environ 100 k€. A la condition que le projet de Bras-Panon soit retenu à l'issu de l'appel à projet, il semblerait que le projet voit le jour à la toute fin 2011 et ce grâce aux subventions alloués par la Région.

IV. CdC, DCE & AO

Afin d'être le plus réactif possible, la direction de la collectivité de Bras-Panon à décidé de constituer un dossier de consultation des entreprises (DCE) avant même d'avoir la certitude du lancement d'un appel

à projet régional et encore moins une réponse sur sa candidature à cet appel à projet. Ce sont les bureaux d'études (BE) de génie électrique qui seront consultés pour la mise en place d'une telle installation. Le travail de l'ARER en temps qu'accompagnateur de ce projet au sein de Bras-Panon est la rédaction d'un cahier des charges technique qui sera inclus par la suite dans le DCE. Une fois le BE retenu, il se verra affecté la fonction de maître d'œuvre avec les responsabilités que ce statut incombe :

- ✓ Découpage du système en plusieurs lots,
- ✓ Rédaction de l'appel d'offre pour ces différents lots,
- ✓ Rédaction du cahier des clauses techniques particulières (CCTP) de l'installation,
- ✓ Mise en service de la station de recharge solaire,
- ✓ Suivi de l'installation pendant une durée de 3 ans,
- ✓ Coordination de la maintenance lourde et légère.

Concernant les délais, la consultation des entreprises sera lancée dès la parution de l'appel à projet de la Région avec 6 semaines de délais et un rapport intermédiaire à 3 semaines. Cette stratégie d'anticipation permettra à la collectivité d'être opérationnelle dès la réponse à un possible appel à projet et de démarrer les études et travaux au plus tôt, ainsi les achats de matériel pourront se faire sur le budget 2011 de la commune.

CONCLUSION GENERALE

I. SUJET DE THESE PROFESSIONNEL

La programmation de l'outil de dimensionnement des stations de recharge solaire a constitué l'essentiel de ma thèse professionnelle. Le développement d'un tel outil est très fastidieux et demande énormément de rigueur, d'autant plus que les débogueurs sont rares et plutôt mal conçus sous Matlab. Afin de prendre un certain recul, à plusieurs reprises, j'ai sollicité une personne extérieure au projet afin qu'elle puisse me rendre un feedback fonctionnel sur l'outil de dimensionnement. Parmi les milliers de lignes de code du programme, les quelques lignes présentées en Annexe L sont issues du bloc de calcul le plus important du programme (Cf. § IV.3 Chapitre 2). Afin d'augmenter encore et encore la résolution de détails de l'outil de simulation, il a été question de créer un bloc de programme dédié aux parcours des véhicules électriques. Cela dans le but d'estimer plus finement la part d'énergie récupérée au freinage et par conséquent la consommation des véhicules. Ce bloc n'a malheureusement jamais vu le jour, et ce pour des raisons essentiellement liées à la complexité d'interfacer l'outil avec l'API de Google map. En revanche, cela m'a permis de nouer bon contact avec une équipe de chercheurs Suisses qui ont développé une application web très fonctionnelle et extrêmement précise quant à l'estimation de la consommation des véhicules électriques [23]. Cela m'a également permis d'approfondir le fonctionnement des systèmes de récupération d'énergie au freinage installés sur les véhicules électriques actuels, ce système étant dérivé du monde de la formule 1 et plus couramment appelé dans le jargon : KERS pour **K**inetic **E**nergy **R**ecovery **S**ystem.

II. REGARD CRITIQUE

Avec le recul nécessaire sur cette mission au sein de l'ARER, je me rends compte que l'aspect politique des EnR est très important, voir plus important parfois que l'aspect technique. En effet, un projet aussi bien dimensionné qu'il soit, peut ne jamais voir le jour si malencontreusement un élu n'en comprend ni le sens ni la nécessité. Dès lors, lorsque ce fait est assimilé, on découvre une toute autre facette du métier de chargé de projet : la communication avec les acteurs politiques locaux. Cela est d'autant plus vrai dans le secteur public puisque les subventions et aides diverses sont accordées par des personnes ou consensus politiques. D'une manière générale, cette mission au sein de l'ARER m'a permis de sortir des sentiers de l'engineering classique et de prendre en compte d'autres aspects tels que les relations politiques qui contribuent aussi bien à la réussite du projet. L'effet d'insularité est également à prendre en compte lors d'un montage de projet tel que celui-ci. Il s'est avéré que des solutions technologiques ont été écartées pour la simple raison que les compétences de maintenance ou d'installation ne sont pas présentes sur l'île. Il en va de même pour le choix des véhicules électriques qui est très restreint à la Réunion. La question du fret maritime du matériel peut être également un facteur limitant, pour exemple la solution technologique de stockage tampon proposée par la société CellStrom (Cf. Annexe B) nécessite le recours à des conteneurs spéciaux pour son acheminement depuis la métropole.

Par ailleurs, l'effet d'insularité crée une certaine synergie entre les acteurs locaux concernés par les énergies renouvelables et le développement durable, ces derniers étant à même de discerner les changements climatiques néfastes directement sur leur environnement proche. Si l'on rajoute à cela un public qui est très sensibilisé depuis le jeune âge aux enjeux environnementaux auxquels est confrontée la Réunion, on obtient un territoire qui est propice au développement des énergies renouvelables. D'autre part il s'avère que nous sommes actuellement à un moment déterminant des choix stratégiques pour la Réunion en matière d'énergie (électricité et transport) puisque le Conseil Régional

et l'Etat (DEAL/ADEME) doivent co-élaborer un Schéma Régional Climat Air Energie régional pour cette fin d'année 2011. Les discussions sur la place du véhicule électrique et du stockage de l'énergie sont donc au cœur des débats. L'enjeu est immense car il faut statuer sur des objectifs à l'horizon 2020 et 2030 de développement des EnR, du stockage et des véhicules électriques et inscrire cela dans un document qui ne sera révisé qu'en 2016 ou 2017.

Le retour à l'autonomie énergétique de l'île de La Réunion à l'horizon 2030 est donc largement envisageable à la condition sinequanone que les instances politiques suivent et soutiennent de manière pérenne les projets EnR au fil des années et au travers des mandats...

TABLE DES ILLUSTRATIONS

Figure 1 : Diagramme de Gantt du projet.....	15
Figure 2 : Schéma technique de l'installation.....	17
Figure 3 : Batteries de la gamme OPzS de chez Hoppecke.....	18
Figure 4 : Onduleur SMA Sunny Boy 5000 TL.....	20
Figure 5 : Onduleur SMA Sunny Island 5048.....	20
Figure 6 : Scooter Vectrix MS1.....	21
Figure 7 : Renault Kangoo ZE.....	21
Figure 8 : Mistubishi i-MiEV.....	22
Figure 9 : Goupil G3.....	22
Figure 10 : Scooter Yamaha XMAX 125.....	23
Figure 11 : Renault Kangoo dCi 70.....	23
Figure 12 : Citroën C3 HDI 70.....	23
Figure 13 : Toyota Dyna 100 Simple Cab.....	24
Figure 14 : Les différents types de charge pour les véhicules électriques (2).....	25
Figure 15 : Les différents modes de charge pour véhicules électriques (2).....	25
Figure 16 : Borne BBR DBT (2).....	25
Figure 17 : Sunny WebBox SMA.....	27
Figure 18 : Coffret de communication DBT.....	27
Figure 19 : 1 ^{ère} phase : recharge de la batterie tampon.....	28
Figure 20 : 2 ^{ème} phase : injection sur le réseau de l'excédentaire PV.....	29
Figure 21 : Illustration du principe de Peak Shaving.....	30
Figure 22 : 3 ^{ème} phase: Peak Shaving lorsque le photovoltaïque produit encore des électrons.....	31
Figure 23 : 4 ^{ème} phase : Peak Shaving avec utilisation de la batterie tampon.....	32
Figure 24 : 5 ^{ème} phase : recharge des véhicules électriques via la batterie tampon.....	33
Figure 25 : 6 ^{ème} phase : recharge des véhicules électriques via le réseau.....	34
Figure 26 : 7 ^{ème} phase : Fonction UPS en cas d'alerte cyclonique.....	35
Figure 27 : Ensoleillement moyen journalier sur l'île de la Réunion (1).....	38
Figure 28 : Choix de la station météo.....	39
Figure 29 : Irradiation en fonction du jour et de l'heure de l'année.....	40
Figure 30 : Irradiation moyenne perçu sur une journée pour les deux saisons principales de la Réunion.....	40
Figure 31 : Irradiation journalière en KWh/m2 en fonction des saisons.....	41
Figure 32 : Données relatives au réseau électrique.....	42
Figure 33 : Données relatives à l'installation Photovoltaïque.....	42
Figure 34 : Choix du parc de véhicules électriques.....	43
Figure 35 : Fenêtre pop-up d'avertissement.....	43
Figure 36 : Indication de la composition du parc VE.....	43
Figure 37 : Caractéristiques de l'entité parc électrique.....	44
Figure 38 : Choix du pack batterie tampon.....	44
Figure 39 : Fenêtre pop-up d'avertissement.....	44
Figure 40 : Caractéristiques du système de stockage tampon.....	45
Figure 41 : Choix de l'onduleur.....	45
Figure 42 : Caractéristiques du système onduleur.....	46
Figure 43 : Choix du type de borne de recharge.....	46
Figure 44 : Données relatives à l'aspect économique général du projet.....	47
Figure 45 : Données économiques concernant l'installation PV exit onduleurs.....	48
Figure 46 : Données économiques concernant le pack batterie tampon.....	48
Figure 47 : Données économiques concernant le parc de véhicules électriques.....	49
Figure 48 : Caractéristiques du parc de véhicules thermiques équivalent.....	50
Figure 49 : Données relatives aux émissions carbone.....	51

<i>Figure 50 : Comparaison entre le parc VE et le parc thermique des émissions du réservoir à la roue</i>	<i>55</i>
<i>Figure 51 : Représentation des flux réseau et du bilan carbone qui en découle.....</i>	<i>56</i>
<i>Figure 52 : Emissions du puits au réservoir pour plusieurs cas de dimensionnement.....</i>	<i>57</i>
<i>Figure 53 : Comparaison des coûts kilométrique.....</i>	<i>59</i>
<i>Figure 54 : Détails des coûts kilométriques</i>	<i>59</i>
<i>Figure 55 : Fenêtre pop-up indiquant la rentabilité différentielle du projet.....</i>	<i>60</i>
<i>Figure 56 : Cash Flows cumulés sur la durée d'observation économique du projet</i>	<i>60</i>
<i>Figure 57 : Détails des cash flows pour le projet fossile équivalent</i>	<i>61</i>
<i>Figure 58 : Détails des cash flows pour le projet électrique qui respecte les objectifs d'émissions carbone fixés</i>	<i>61</i>
<i>Figure 59 : Echelle des taux d'enrichissement en capital en fonction des stratégies et des risques.....</i>	<i>62</i>
<i>Figure 60 : Rentabilité différentielle</i>	<i>63</i>
<i>Figure 61 : Plan de masse d'implantation du système sur le champ de foire de la commune de Bras-Panon.</i>	<i>64</i>
<i>Figure 62 : Plan de masse du champ de foire</i>	<i>78</i>
<i>Figure 64 : Critères d'éligibilité à l'intégration simplifiée ou non au bâti.....</i>	<i>80</i>
<i>Figure 65 : Tarifs de rachat de l'énergie photovoltaïque</i>	<i>81</i>
<i>Figure 66 : Différentes vues 3D de l'ensemble de l'installation</i>	<i>83</i>
<i>Figure 67 : Cartographie des principaux projets en cours</i>	<i>93</i>
<i>Tableau 1 : Emissions moyennes des voitures neuves mises sur le marché européen (en gCO2/km).....</i>	<i>11</i>
<i>Tableau 2 : Extrait de la feuille Excel génératrice des données kilométriques.....</i>	<i>38</i>
<i>Tableau 3 : Différentes configuration de dimensionnement issu d'un seul paramétrage de l'utilisateur.....</i>	<i>52</i>
<i>Tableau 4 : Bilan carbone well to tank pour différentes simulations</i>	<i>56</i>
<i>Tableau 5 : Bilan CO₂ du projet incluant l'énergie grise et le fret de la marchandise.....</i>	<i>57</i>
<i>Tableau 6 : Analyse économique pour différentes configurations du système</i>	<i>62</i>

ANNUAIRE DES ACTEURS

ANNUAIRE DES ACTEURS			
Bras Panon			
Service techniques	Frédéric LEGENDRE	frederic.legendre5@wanadoo.fr	06.92.70.31.44
Marchés publics	Audrey RIVIERE	marchés.publics@braspanon.re	02.62.51.50.50
Direction Energie Climat Région Réunion (DGADD)			
Ingénieur	Rémy DURAND	remy.durand@cr-reunion.fr	02.62.30.85.91
Directeur du plan "Energie Climat"	Jules DIEUDONNE	jules.dieudonne@cr-reunion.fr	02.62.30.85.90
Tenesol Ocean Indien			
Ingénieur PV & stockage	Olivier PAPA	o.papa@tenesol.com	06.92.95.42.77

REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES

1. **NEGRE, Louis.** Livre Vert sur les infrastructures de recharge sur les infrastructures de recharge pour les véhicules « décarbonés ». 2011.
2. **DBT.** Borne et système de recharge pour V.E. *Documentation technique.* 2011.
3. **LEGER, Romain.** Centrale photovoltaïque et stockage insulaire ; Simulation et montage de projets. 2010.
4. **SANTAMOURIS, A.** Modeling the Global Solar Radiation on the Earth's Surface Using Atmospheric Deterministic and Intelligent Data-Driven Techniques. 1999.
5. **E.TZIRAKIS, et al.** Vehicule Emissions and driving cycles. Comparaison of the Athens Driving Cycle (ADC) with ECE-15 and European Driving Cycle (NEDC). 2006. Vol. 8, 3. 282-290.
6. **SETHURAMANA, Vijay, KOWOLIKA, Kristin et SRINIVASANA, Venkat.** Increased cycling efficiency and rate capability of copper-coated silicon anodes in lithium-ion batteries. 2010. Vol. 196, 393-398.
7. **EBERHARD, Martin.** The 21st Century Electric Car. s.l. : Tesla Motors Incorporation, 2006.
8. **GONCUKLIYAN, Alexandre.** Entretien d'un Véhicule Electrique. *www.france-mobilite-electrique.org.* [En ligne] 2011. <http://www.france-mobilite-electrique.org/%E2%96%B8-entretien-d-un-vehicule,1626.html>.
9. Statistiques générales. [En ligne] 08 2011. http://www.entretien-auto.com/statistiques_membres.php.
10. **Gouvernement.** Code général des impôts. *Taxe sur les véhicules des sociétés.* 29 juillet 2011. Article 1010.
11. **ADEME.** Note de cadrage sur le contenu CO2 du kWh par usage en France. 14 janvier 2005.
12. **DAVID, Jean-Nicolas.** Grand Coude : D'une Stratégie Énergétique au Développement Durable de Territoire. s.l. : ARER, 2006.
13. **IEA.** Compared assessment of selected environmental indicators of photovoltaic electricity in OCDE cities. 2006. Vol. Report IEA-PVPS T10-01.
14. **Alsema, E. et Wild-Scholten, M.J.** The real environmental impacts of crystalline silicon PV modules: an analysis based on up-to-date manufacturers data.
15. **Alsema, E.A, P.Frankl et Kato, K.** Energy pay-back time of photovoltaic energy systems : present status and prospects.
16. **Dataloy VMS.** [En ligne] <http://www.dataloy.com/>.
17. **Sogreah.** Potentiel energies renouvelables, maîtrise de l'énergie. Commune de Bras-Panon. 2009. Vol. Rapport final, 1.37.0337.
18. **Gouvernement.** Arrêté du 4 mars 2011 portant abrogation de l'arrêté du 31 août 2010 fixant les conditions d'achat de l'électricité produite par les installations utilisant l'énergie radiative du soleil telles que visées au 3° de l'article 2 du décret n° 2000-1196. 2011. JORF n°0054 du 5 mars 2011 page 4218.
19. —. Conditions d'achat de l'électricité produite par les installations d'une puissance inférieure ou égale à 36 kVA pouvant bénéficier de l'obligation d'achat. 2002. J.O n° 62 du 14 mars 2002 page 4620 texte n° 7.
20. —. Arrêté du 23 avril 2008 relatif aux prescriptions techniques de conception et de fonctionnement pour le raccordement à un réseau public de distribution d'électricité en basse tension ou en moyenne tension d'une installation de production d'énergie. *Article 22.* 2008.

21. Convention du 8 décembre 2010 entre l'Etat et l'ADEME relative au programme d'investissements d'avenir (programme « véhicule du futur »). 2010. JORF n°0286 page 21586.
22. **ADEME**. Expérimentations liées aux infrastructures de recharge pour les véhicules électriques et hybrides rechargeables. *Appel à manifestation d'intérêt*. 2011.
23. **Vaudois, Centre Professionnel du Nord**. <http://www.jurassictest.ch/GR/>. [En ligne] [Citation : 30 08 2011.]
24. **LEVY, Matthias**. *Mix énergétique de la Réunion en 2030*. 2008. http://www.arer.org/pj/articles/302_Rapport-Mix-energetique-Reunion-2030.pdf.
25. **EDF**. EDF, acteur incontournable de la mobilité électrique. 2010. Vol. Dossier de presse.

NOMENCLATURE DES SIGNES / GLOSSAIRE

AAP : Appel à Projet
AC: Alternating Current
ACV : Analyse de Cycle de Vie
ADEME : Agence de l'Environnement et de la Maîtrise de l'Energie
AMI : Appel à Manifestation d'Intérêt
AO : Appel d'Offre
ARER : Agence Régionale de l'Energie Réunion
ATBR : Association de Traitements des Batteries de la Réunion
BE : Bureau d'Etude
BMS : Battery Managment System
CCTP : Cahier des Clauses Techniques Particulières
CF : Cash Flow
DC : Direct Current
DCE : Dossier de Consultation des Entreprises
DOD : Deep Of Discharge
EIE : Espaces Info Energies
ELD : Entreprise Locale de Distribution
EnR : Energies Renouvelables
GERRI : Grenelle de l'environnement à la Réunion : Réussir l'innovation
GES : Gaz à Effet de Serre
IAB : Intégration au Bâtiment
ISB : Intégration Simplifié au Bâtiment
KERS : Kinetic Energy Recovery System
LOOM : Loi d'Orientation pour l'Outre-mer
MDE : Maîtrise De l'Energie
NEDC : New European Driving Cycle
OER : Observatoire de l'Energie de la Réunion
PETREL : Plan Economique de Transition et de Relance par les Energies 100% Locales
PPP : Partenariat Public Privé
PRERURE : Plan Régional des Energies Renouvelables et d'Utilisation Rationnelle de l'Energie
SOC : State Of Charge
STARTER : STratégie d'Autosuffisance énergétique pour la Relance et la Transition de l'Economie Réunionnaise
T2W : Tank to Wheel
TEC: Taux d'Enrichissement en Capital
TVS: Taxe sur les Véhicules de Société
UPS : Uninterruptible Power Supply
VAN: Valeur Actuelle Net
VER : Véhicule Electrique Rechargeable
VERT : Véhicules Électriques pour une Réunion Technologique
W2W : Well to Wheel
W2T : Well to Tank

ANNEXES



ANNEXE A : PLAN DE MASSE DU CHAMP DE FOIRE

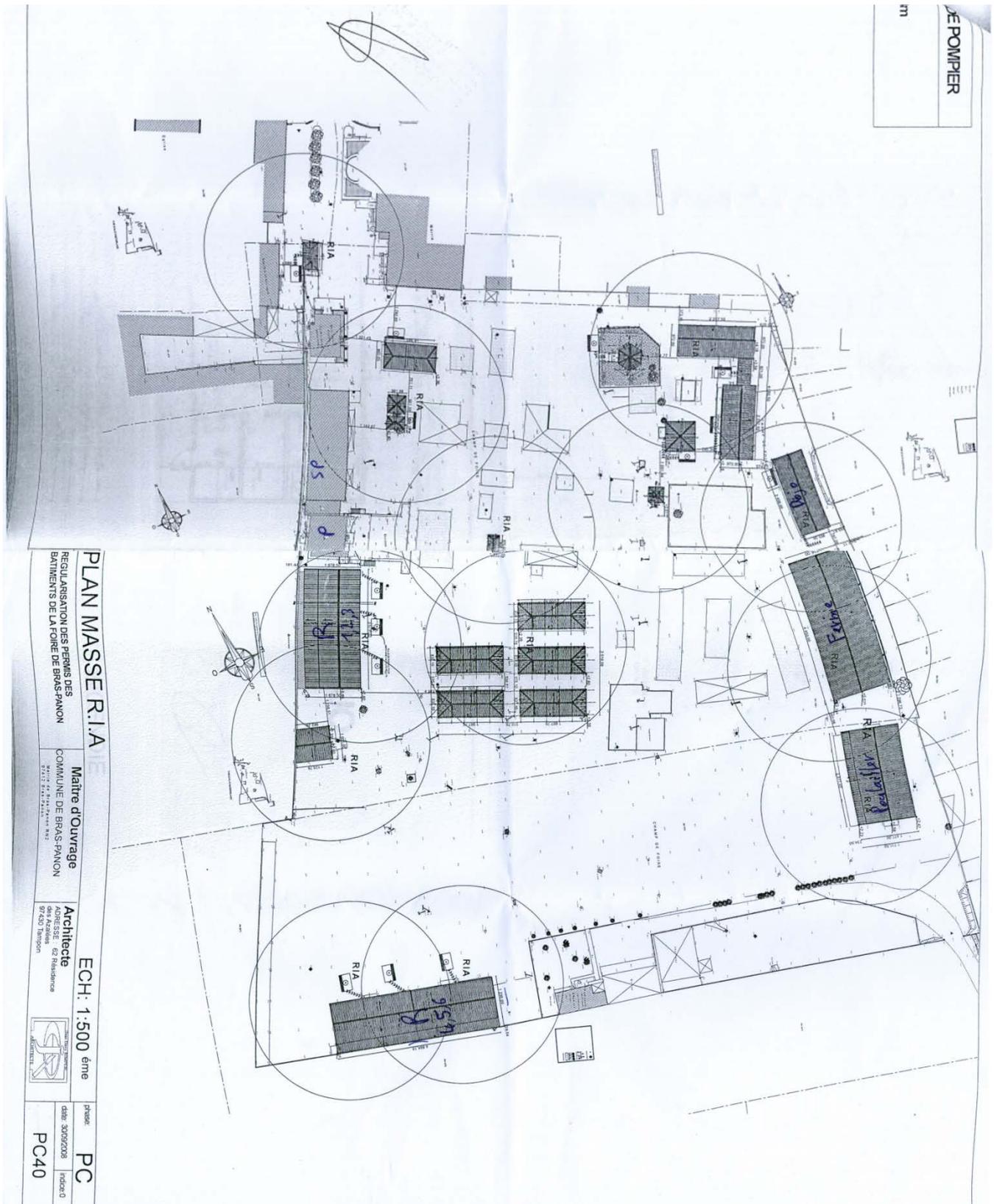


Figure 62 : Plan de masse du champ de foire



ANNEXE B : TECHNOLOGIE VANADIUM

Annexe B.1 : Avantages et inconvénients

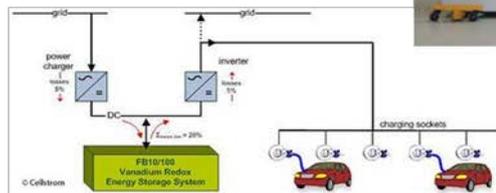
➔ 1 CellCube FB: 10 kW, 100 kWh

Avantages :

- Technologie innovante
- DOD max = 100%
- Durée de vie : 20 ans
- Onduleurs SMA & contrôle commande intégrés
- Prise 220V / 16A intégrés à la batterie

Inconvénients :

- Onéreux
- Disponibilité
- Maintenance
- Transport depuis Autriche



Annexe B.2 : Schéma technique de l'installation

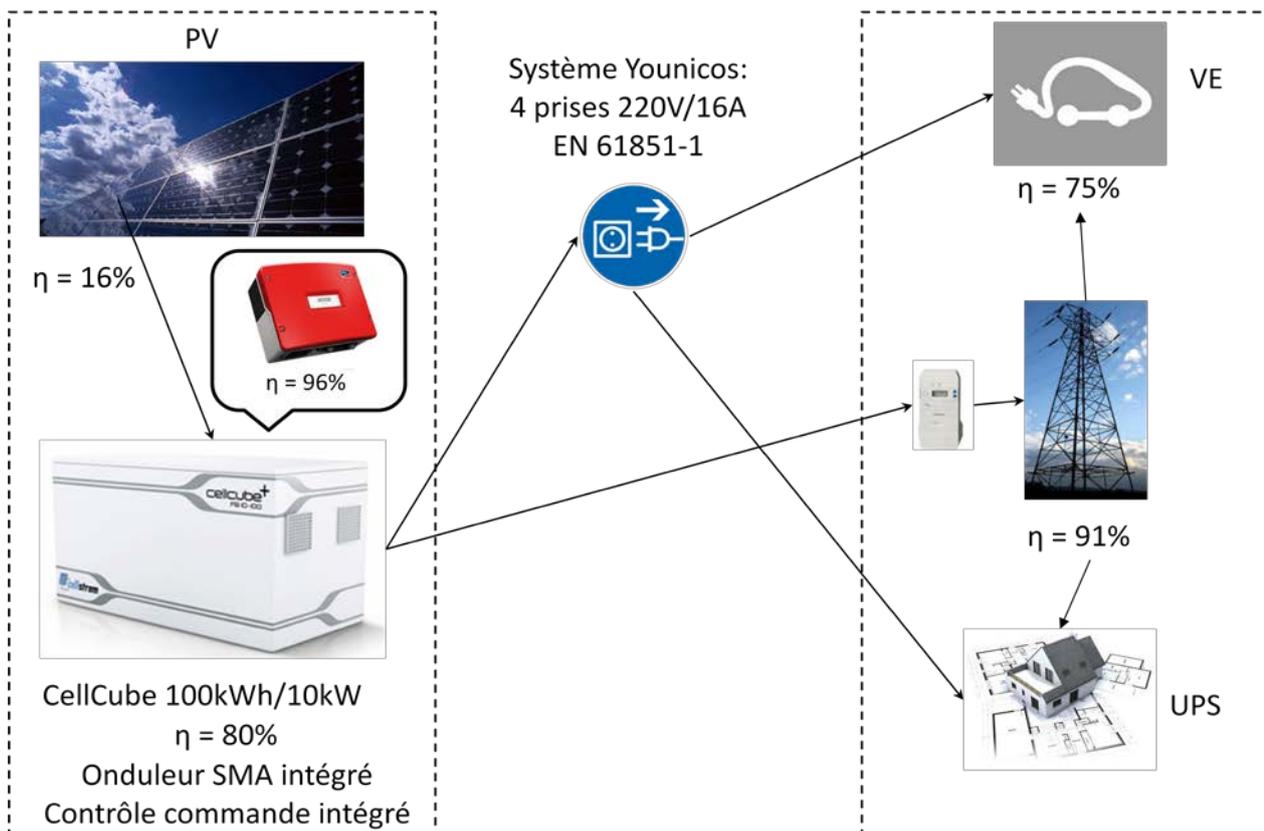
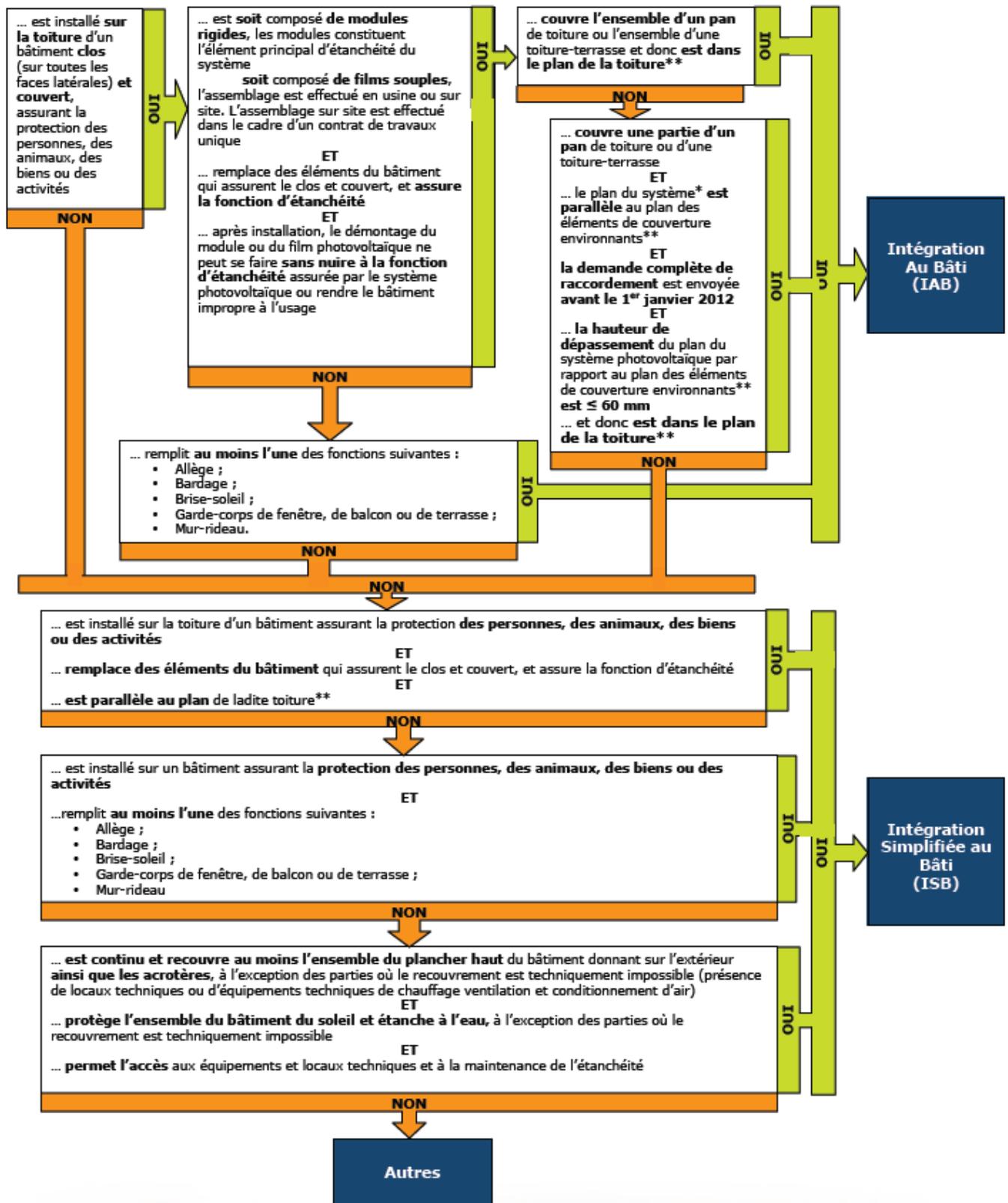


Figure 63 : Schéma technique de l'installation avec système de stockage tampon Vanadium

ANNEXE C : LES TARIFS D'ACHAT PHOTOVOLTAÏQUES

Annexe C.1 : Critères d'éligibilité avant le 1^{er} janvier 2012



* le plan du système est défini comme étant le plan tangent aux points hauts du champs des modules photovoltaïque, hors éléments en saillie (châtières, abergements, élément de ventilation du procédé...)

** le plan des éléments de couverture est défini comme étant le plan tangent aux points hauts des éléments de couverture, hors éléments en saillie (faîtage, châtière, fenêtres de toit...)

Figure 64 : Critères d'éligibilité à l'intégration simplifiée ou non au bâti

Annexe C.2 : Tarifs de rachat

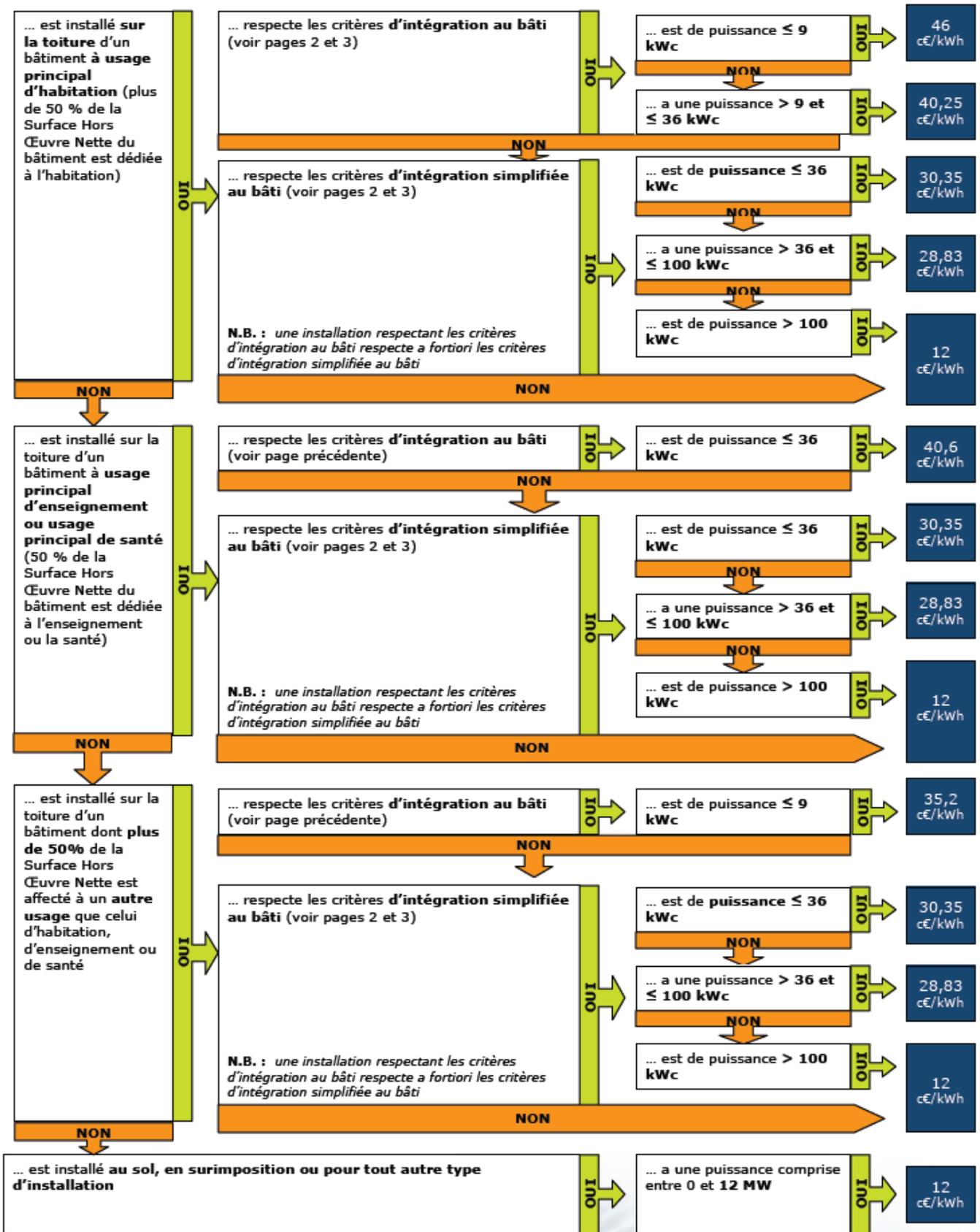


Figure 65 : Tarifs de rachat de l'énergie photovoltaïque

ANNEXE D : SCENARII DE FLOTTE ELECTRIQUE

Annexe D.1 : Scenario ECO

- 2 Scooter Vectrix MS1 => Police municipale (2 Zenith)

✓ 2 x 10 300 €



- 1 Kangoo ZE => Service Env (Citroen Berlingo 584 BWV)

✓ 16 300 € + 79 €/mois



- 2 IMIEV => Citroen C3 332 BRX / 982 BVE

✓ 2 x 31 500 €



Total = 99 900 € + 79 €/mois

N.B: Tous les véhicules présentés ici sont dispo à la Réunion, les prix sont TTC et tiennent compte des bonus ADEME ou Eco.

Annexe D.2 : Scenario PREMIUM

- 2 Scooter Vectrix MS1 => Police municipale (2 Zenith)

✓ 2 x 10 300 €



- 2 Kangoo ZE => Berlingo 584 BWV / Kangoo 967 BGL

✓ 2 x (16 300 € + 79 €/mois)



- 3 IMIEV => Citroen C3 332 BRX / 982 BVE / 331 BRX

✓ 3 x 31 500 €



- 1 Goupil G3 => Service Env (Nissan CABSTAR 798 BVA)

✓ 28 000 €



Total = 175 700 € + 158 €/mois

N.B: Tous les véhicules présentés ici sont dispo à la Réunion, les prix sont TTC et tiennent compte des bonus ADEME ou Eco.

ANNEXE E : VUES 3D DE L'ENSEMBLE DE L'INSTALLATION

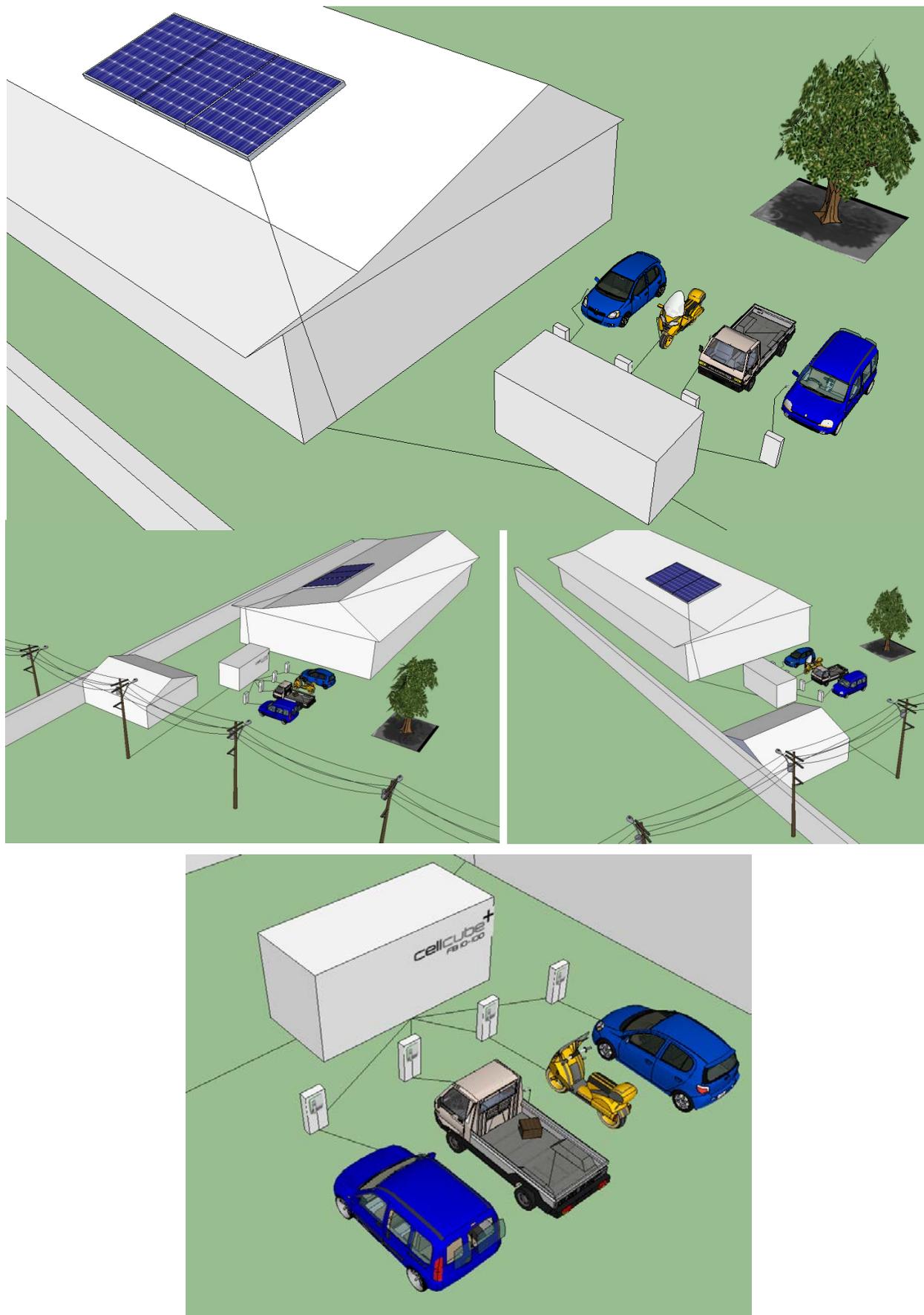
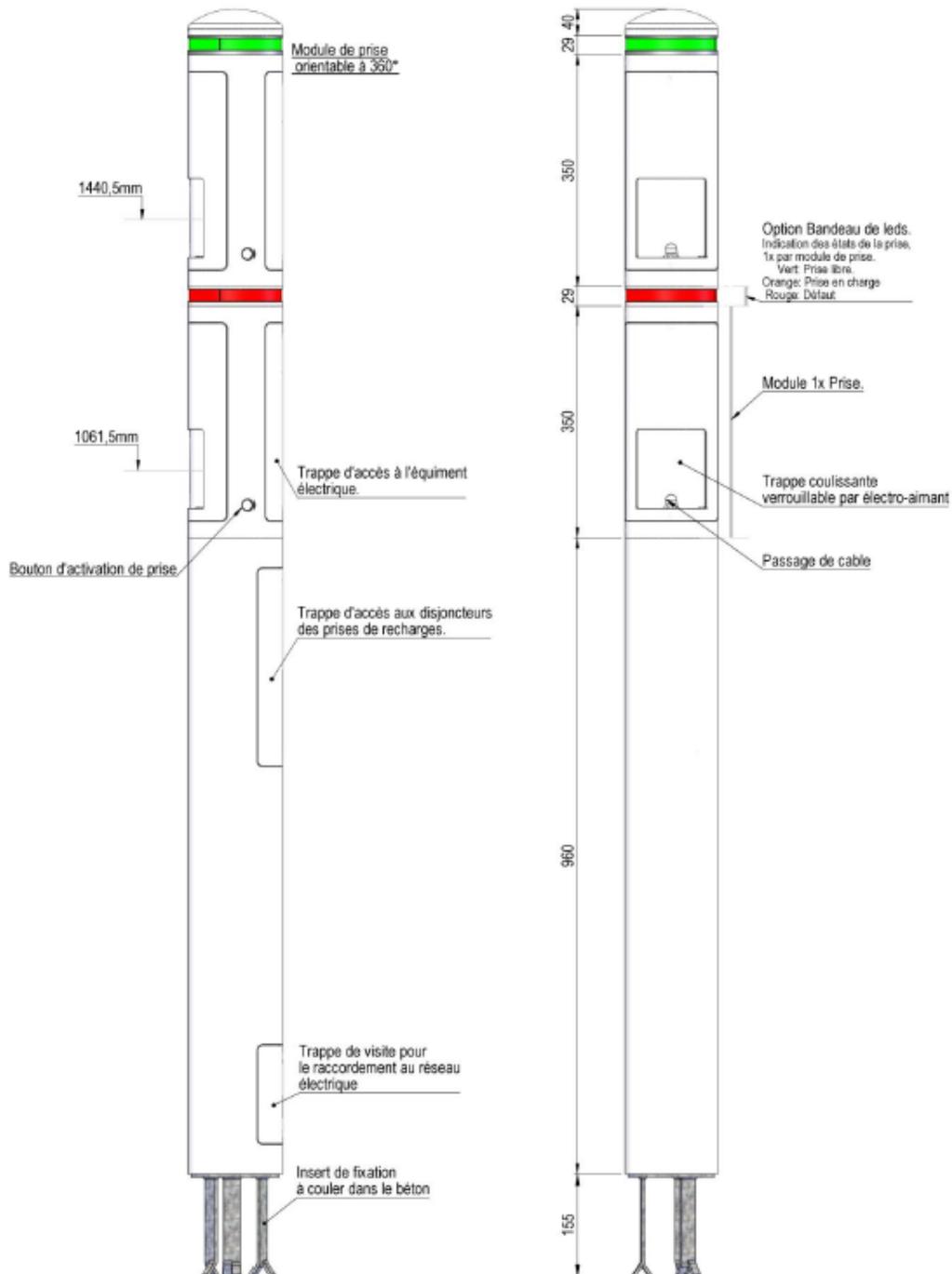


Figure 66 : Différentes vues 3D de l'ensemble de l'installation

ANNEXE F : DOCUMENTATION TECHNIQUE BORNE DE RECHARGE BBR

	<p>DOCUMENTATION TECHNIQUE GENERALE BORNES ET COFFRETS DE RECHARGE POUR LES VEHICULES ELECTRIQUES Borne de Recharge type "BBR"</p>	<p>5/8</p>
---	--	------------



	<p>DBT – Parc Horizon 2000 – 62117 BREBIERES ☎ : (33) 03 21 50 92 92 - 📠 : (33) 03 21 50 92 90 Web : www.dbt.fr - E-mail : info@dbt.fr</p>	<p>Mai 2011 DOT180.A</p>
---	---	---------------------------------------

Plans et modèles déposés- Le présent document est la propriété de DBT qui se réserve le droit de le modifier à tout moment sans préavis - IPNS





DOCUMENTATION TECHNIQUE GENERALE
BORNES ET COFFRETS DE RECHARGE
POUR LES VEHICULES ELECTRIQUES
 Borne de Recharge type "BBR"

7/8

Installation de la borne

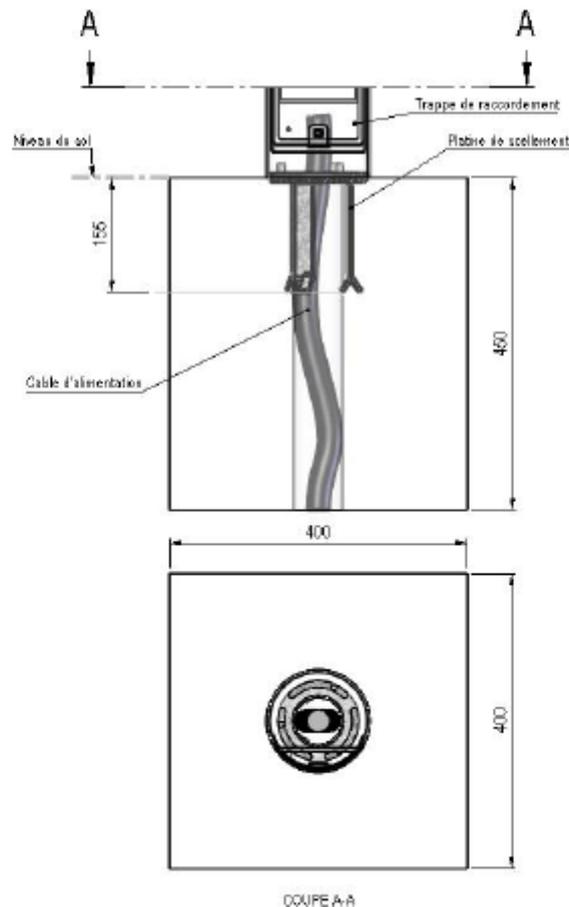
Les instructions suivantes sont données à titre indicatif. L'installateur de la borne devra s'assurer, en fonction des conditions particulières de l'installation, que celles-ci sont suffisantes. L'ensemble des réalisations de l'installateur (béton, raccordement,...) devront être faites dans « les règles de l'art » et assurer la solidité et la sécurité de l'ensemble. La borne sera installée sur un socle en béton dans lequel aura été coulée une platine de scellement (en option avec la borne). Le socle en béton devra être réalisé en avance de façon à être suffisamment solide pour recevoir la borne lors de la mise en place. Le socle se fera selon les spécifications dimensionnelles du plan en bas de page.

L'alimentation se fera par un câble adapté à la puissance de la borne.

Le câble doit passer dans le socle béton et dépasser d'environ 1 mètre.

1. Mise en place de la borne sur son socle

- 1) Dégager l'espace autour du socle en béton qui va recevoir la borne,
- 2) Déposer délicatement la borne sur son socle en veillant à la disposition des fixations,
- 3) Fixer la borne de l'intérieur avec 3 écrous freins M8,



DBT – Parc Horizon 2000 – 62117 BREBIERES
 ☎ : (33) 03 21 50 92 92 - 📠 : (33) 03 21 50 92 90
 Web : www.dbt.fr - E-mail : info@dbt.fr

Mai 2011
 DOT180.A

Plans et modèles déposés - Le présent document est la propriété de DBT qui se réserve le droit de le modifier à tout moment sans préavis - IPNS



ANNEXE G : FICHE TECHNIQUE BATTERIES HOPPECKE

OPzS solar.power

Vented lead-acid battery
for cyclic applications



Motive Power Systems

Reserve Power Systems

Special Power Systems

Service

Your benefits with HOPPECKE OPzS solar.power

- **Highest cycle stability during PSoC¹ operation** - due to tubular plate design with efficient charge current acceptance
- **Maximum efficiency with reduced charging factor** - ready for use of optional electrolyte recirculation
- **Maximum compatibility** - dimensions according to DIN 40736-1
- **Higher short-circuit safety even during the installation** - based on HOPPECKE system connectors
- **Extremely extended water refill intervals up to maintenance-free** - optional use of AquaGen® recombination system minimizes emission of gas and aerosols²



Typical applications of HOPPECKE OPzS solar.power

- **Solar-/Off-grid applications**
Power supply for remote off-grid applications and isolated power networks, drinking water supply systems, healthcare facilities
- **Telecommunications**
Mobile phone stations, BTS-stations, off-grid/on-grid solutions
- **Traffic systems**
Signalling systems, lighting

 **HOPPECKE**
POWER FROM INNOVATION

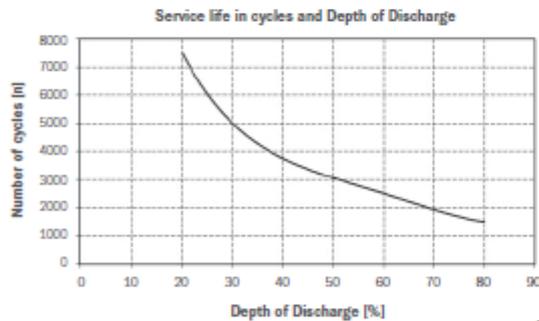


OPzS solar.power

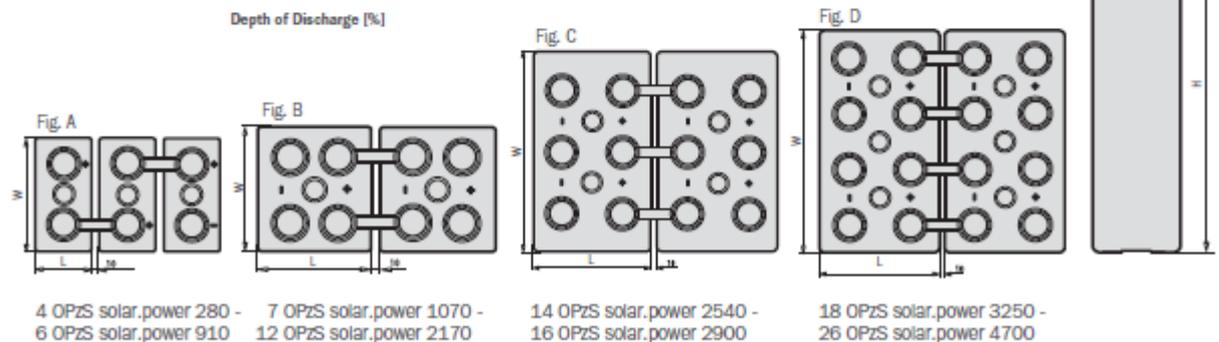
Type overview

Capacities, dimensions and weights

Type	C ₁₀₀ /1.85 V Ah	C ₅₀ /1.85 V Ah	C ₂₄ /1.83 V Ah	C ₁₀ /1.80 V Ah	C ₅ /1.77 V Ah	max. Weight kg	Weight electrolyte kg (1.24 kg/l)	max.* Length L mm	max.* Width W mm	max.* Height H mm	Fig.
4 OPzS solar.power 280	280.0	265.0	244.8	213.0	181.5	17.3	4.5	105	208	420	A
5 OPzS solar.power 350	350.0	330.0	307.2	266.0	227.0	21.0	5.6	126	208	420	A
6 OPzS solar.power 420	420.0	395.0	369.6	320.0	272.5	24.9	6.7	147	208	420	A
5 OPzS solar.power 520	520.0	490.0	453.6	390.0	345.0	29.3	8.5	126	208	535	A
6 OPzS solar.power 620	620.0	585.0	542.4	468.0	414.0	34.4	10.1	147	208	535	A
7 OPzS solar.power 730	730.0	685.0	633.6	546.0	483.0	39.5	11.7	168	208	535	A
6 OPzS solar.power 910	910.0	860.0	796.8	686.0	590.0	46.1	13.3	147	208	710	A
7 OPzS solar.power 1070	1070.0	1001.9	930.3	800.6	691.3	59.1	16.7	215	193	710	B
8 OPzS solar.power 1220	1220.0	1145.0	1063.2	915.0	790.0	63.1	17.3	215	193	710	B
9 OPzS solar.power 1370	1370.0	1282.5	1192.3	1026.0	886.5	72.4	20.5	215	235	710	B
10 OPzS solar.power 1520	1520.0	1425.0	1324.8	1140.0	965.0	76.4	21.1	215	235	710	B
11 OPzS solar.power 1670	1670.0	1572.1	1458.6	1255.8	1086.3	86.6	25.2	215	277	710	B
12 OPzS solar.power 1820	1820.0	1715.0	1591.2	1370.0	1185.0	90.6	25.8	215	277	710	B
12 OPzS solar.power 2170	2170.0	2010.0	1843.2	1610.0	1400.0	110.4	32.7	215	277	855	B
14 OPzS solar.power 2540	2540.0	2349.4	2163.0	1881.3	1631.9	142.3	46.2	215	400	815	C
16 OPzS solar.power 2900	2900.0	2685.0	2472.0	2150.0	1865.0	150.9	45.9	215	400	815	C
18 OPzS solar.power 3250	3250.0	3015.0	2764.8	2412.0	2097.0	179.1	56.4	215	490	815	D
20 OPzS solar.power 3610	3610.0	3350.0	3072.0	2680.0	2330.0	187.3	55.7	215	490	815	D
22 OPzS solar.power 3980	3980.0	3685.0	3388.0	2951.7	2562.1	212.5	67.0	215	580	815	D
24 OPzS solar.power 4340	4340.0	4020.0	3696.0	3220.0	2795.0	221.2	66.4	215	580	815	D
26 OPzS solar.power 4700	4700.0	4355.0	4004.0	3488.3	3027.9	229.6	65.4	215	580	815	D



C₁₀₀, C₅₀, C₂₄, C₁₀ and C₅ = Capacity at 100 h, 50 h, 24 h, 10 h and 5 h discharge
 * according to DIN 40736-1 data to be understood as maximum values



Optimal environmental compatibility - closed loop for recovery of materials in an accredited recycling system.

IEC 60896-11
 IEC 61427

¹ Partial State of Charge (Teilentladebetrieb)
² Similar to sealed lead-acid batteries



HOPPECKE Batterien GmbH & Co. KG
 P.O. Box 1140 · D-59914 Brilon · Germany
 Bontkirchener Straße 1 · D-59929 Brilon-Hoppecke

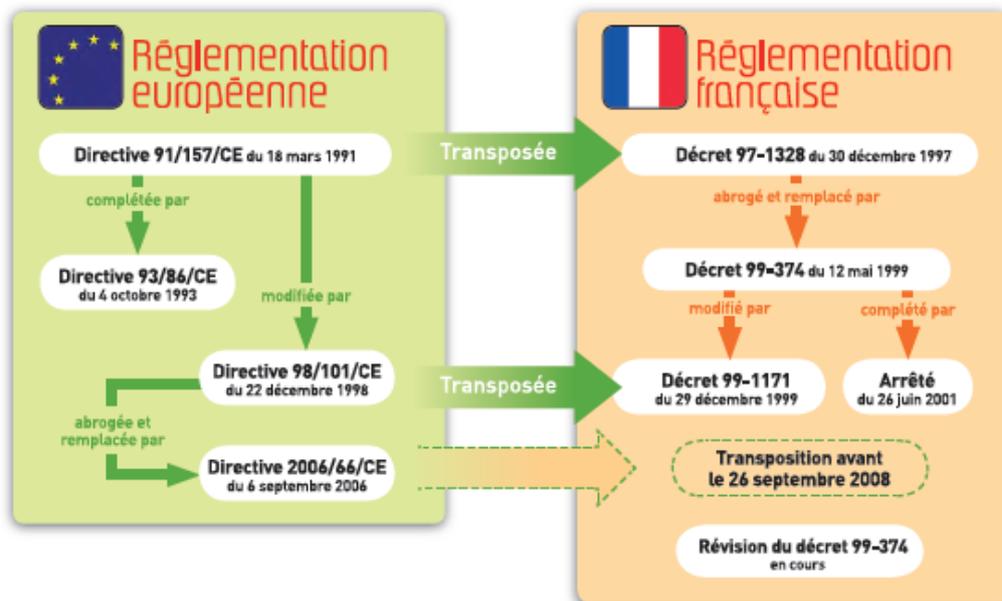
Phone: + 49 (0) 29 63 61-3 74 Email: info@hoppecke.com
 Fax: + 49 (0) 29 63 61-2 70 Internet: www.hoppecke.com



ANNEXE H : FILIERE DE RECYCLAGE DES ACCUMULATEURS AU PLOMB A LA REUNION



➔ RÉGLEMENTATION



CE QU'IL FAUT SAVOIR

NATURE DU PRODUIT

Les accumulateurs au plomb (ou batteries au plomb) sont des générateurs électrochimiques utilisés comme source d'énergie dans les véhicules ou les équipements industriels.

On trouve plusieurs types de batteries au plomb :

- Batterie de démarrage « classique »
- Batterie de traction
- Batterie stationnaire industrielle
- Batterie au gel plomb

Le gisement d'accumulateurs au plomb à la Réunion est d'environ 2 500 tonnes par an (source douanes 2008).

DANGER DU PRODUIT

Les accumulateurs contiennent du plomb et de l'acide sulfurique (appelé électrolyte), nocifs pour la santé humaine et l'environnement. C'est pourquoi ils doivent être stockés dans des récipients étanches et résistants à l'acide avant d'être recyclés dans des unités industrielles autorisées.

CLASSE DU DÉCHET

Les accumulateurs au plomb sont des déchets dangereux, classés sous les rubriques 20 01 33* et 16 06 01* au titre du décret n° 2002-540 du 18 avril 2002 relatif à la classification des déchets, codifié aux Articles R 541-7 à R 541-11 du code de l'environnement.

L'astérisque (*) identifie le déchet comme dangereux.

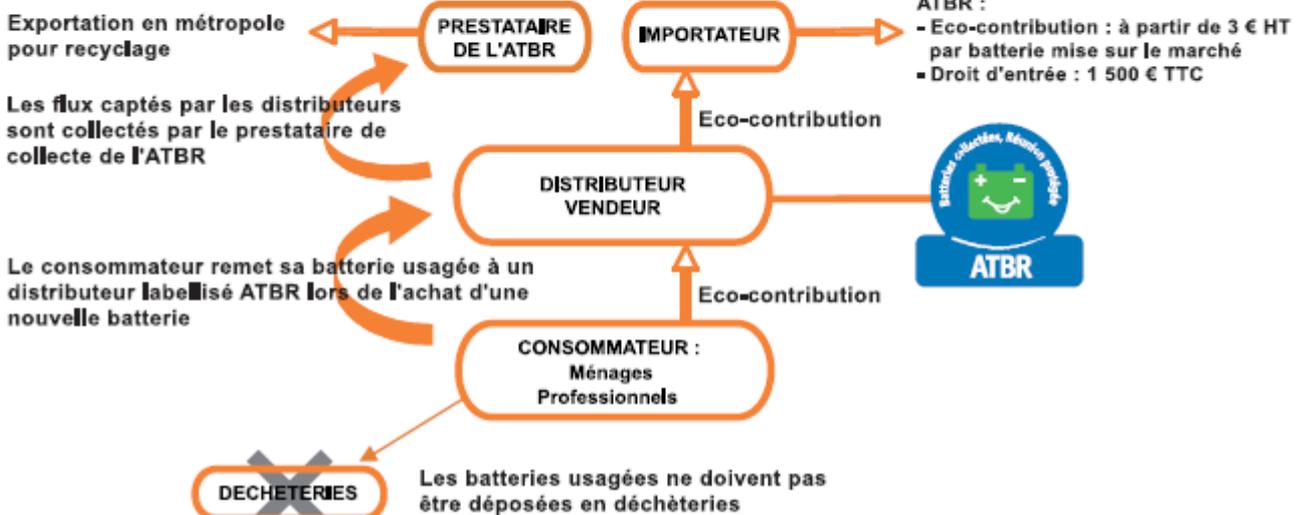
ORGANISATION

EN PLACE À LA RÉUNION DEPUIS 2001

LES ACTEURS DE LA FILIÈRE À LA RÉUNION

- L'**ATBR** (Association de Traitement des Batteries de la Réunion) est l'éco-organisme local conventionné qui organise et finance la filière à la Réunion. L'ATBR a été créée en juillet 2001 par la fédération de quelques producteurs de batteries. La filière fonctionne grâce aux droits d'entrée et aux éco-contributions versés par ces producteurs à l'ATBR.
Eco-contribution : à partir de 3 € HT par batterie mise sur le marché.
Droit d'entrée : 1 500 € TTC.
- Le **SICR** (Syndicat de l'Importation et du Commerce de la Réunion) gère l'ATBR.
- Le **CRMM** (Centre de Récupération des Métaux de la Mare) est la plateforme de regroupement et de transit des accumulateurs au plomb, prestataire de l'ATBR.

LA FILIÈRE



Consultez les distributeurs labellisés ATBR les plus proches de chez vous sur le site SICR : www.sicr.re

LE RECYCLAGE

Les accumulateurs au plomb sont recyclés suivant les 3 étapes suivantes :

1. Cassage séparation

Les batteries sont broyées afin d'en extraire les matières suivantes :

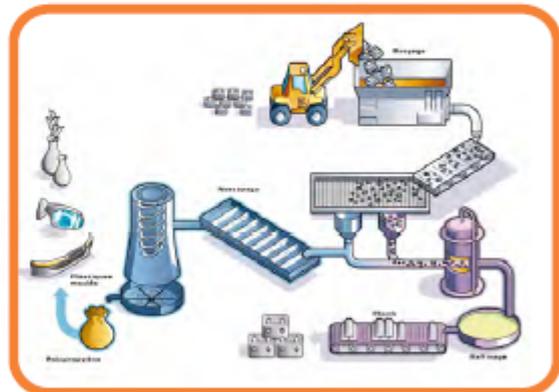
- La pâte de plomb provenant de la matière active de la batterie
- Le plomb métallique provenant des grilles et des connexions
- Le polypropylène provenant du boîtier de la batterie
- L'électrolyte (acide sulfurique + eau)

2. Fusion-réduction

La seconde étape du procédé consiste à traiter les déchets métalliques et les pâtes venant du broyeur en les fondant à une température d'environ 1 000°C pour obtenir du plomb d'œuvre.

3. Affinage

Le plomb d'œuvre est ensuite épuré, enrichi de certains métaux puis coulé en lingots qui seront utilisés par les fabricants de batteries.



LES CONTACTS

Pour toute demande d'information sur la filière, contactez :



ATBR
Tél : 02 62 41 10 57
Fax : 02 62 41 97 72
www.sicr.re
(rubrique recyclage)



SICR
Tél : 02 62 21 26 73
Fax : 02 62 41 97 72
www.sicr.re



ADEME REUNION
Tél : 02 62 71 11 30
Fax : 02 62 71 11 31
www.ademe.fr



ANNEXE I : FICHES STATISTIQUES DES VEHICULES THERMIQUES

Annexe I.1 : Fiche Citroën C3 n°332 BRX

- Véhicule de Mr LEGENDRE Frédéric (Service Technique)
- Dates d'étude : 01/09/09 au 06/04/10
- 4 CV
- Diesel
- Distance par an = 2 040 km
- Distance moyenne = 9.5 km / jr
- Distance max = 67 km ==> AR St Denis
- Distance min = 1 km ==> Déplacement interne Bras Panon
- Destinations principales : Chantiers Bras Panon et alentours
- Frais maintenance 2009 = 64€
- Frais maintenance 2010 = 307€

Annexe I.2 : Fiche Renault Kangoo n° 967 BGL

- Véhicule de Mme FAMARE Marie
- Dates d'étude : 01/09/09 au 06/08/10
- 7 CV
- Diesel
- Distance par an = 4 026 km
- Distance moyenne = 11.8 km / jr
- Distance max = 50 km
- Distance min = 5 km
- Destinations principales : AR centre ville Bras Panon
- Frais maintenance 2009 = 556€
- Frais maintenance 2010 = 470€

Annexe I.3 : Fiche Nissan Kubistar AC 065 LR

- Véhicule de Mr MASSON
- Dates d'étude : 01/09/09 au 19/04/11
- 6 CV
- Diesel
- Distance par an = 17 736 km
- Distance moyenne = 30 km / jr
- Distance max = 100 km
- Distance min = 1 km
- Destinations principales : ??
- Frais maintenance 2009 = 0€
- Frais maintenance 2010 = 253€

Annexe I.4 : Fiche Scooters Zenith

- Véhicule des agents de médiation
- En moyenne 30 km / jr
- Essence
- Plus en circulation depuis 2 ans suite à une casse moteur
- Après discussion avec Mr le chef de la Police Municipale, des 125cm³ seraient plus adéquates.

ANNEXE J : PRESENTATION DE L'ARER

La Loi d'Orientation pour l'Outre-mer (LOOM), du 13 décembre 2000, accorde la compétence en matière de Maîtrise De l'Energie et des Energies Renouvelables au Conseil Régional. Pour relayer la politique de la Région sur le terrain, l'Agence Régionale de l'Energie Réunion (ARER) a été créée en Décembre 2000, à l'initiative du Conseil Régional. Celui-ci a ensuite élaboré et mis en oeuvre le PRERURE en 2003, renforcé par le projet GERRI à l'été 2009. L'objectif de ces plans est d'atteindre l'autonomie énergétique pour la Réunion en matière de production d'électricité d'ici 2030. L'ARER s'intègre dans cette dynamique d'autonomie énergétique.

Elle est une association de loi 1901 à but non lucratif, présidée depuis juin 2010 par Alin GUEZELLO, conseiller régional. Historiquement, et ce jusqu'à cette année, le président de l'association était le président du Conseil Régional. Le bureau est constitué d'élus, ainsi que de représentants des membres de droit. L'équipe est répartie en 3 agences (Saint Denis, Saint Pierre, Saint Pierre IUT (siège social)) et emploie 28 salariés (ingénieurs, techniciens info énergie et personnel administratif). L'emplacement stratégique de chaque agence (région Nord, Sud et Ouest), ainsi que l'ouverture probable d'une antenne dans l'Est de l'île à moyen terme permet de participer à des projets sur l'intégralité du territoire réunionnais.

L'objet social de l'ARER est de promouvoir la maîtrise de l'énergie et l'utilisation rationnelle des énergies renouvelables et de préserver les ressources énergétiques dans une perspective de développement durable. Elle est financée par des membres de droit (qui contribuent au financement de l'association ou d'actions engagées par celle-ci dans le cadre d'une convention d'objectifs pluriannuels) et des membres associés (qui apportent leur soutien à l'objet social de l'association à travers le paiement d'une cotisation). Ces membres peuvent être des collectivités (Conseil Régional, Conseil Général, intercommunalités, communes) ou des partenaires privés (EDF, Bailleurs sociaux, CHR,...).

Les missions de l'ARER sont articulées autour de quatre axes :

- ✓ L'information, l'éducation et la formation sur l'utilisation rationnelle des énergies renouvelables pour l'aménagement, la construction et les transports.
- ✓ Le conseil à maître d'ouvrage pour accompagner les porteurs de projet dans le montage technique, juridique, financier et opérationnel.
- ✓ Le développement des filières technologiques à La Réunion liées aux énergies renouvelables et à la maîtrise de l'énergie.
- ✓ La gestion d'un observatoire des technologies durables et des métiers de l'énergie à La Réunion et d'une plate-forme recherche et développement.

Les objectifs de l'ARER sont donc la promotion et l'utilisation des énergies renouvelables disponibles sur le territoire (énergies de la mer, énergie éolienne, énergie solaire, géothermie, micro hydraulique, énergie issue de la biomasse). Pour cela, plusieurs filières existent au sein de l'association : la filière énergie des mers, la filière biomasse, ou encore la filière hydrogène et stockage de l'énergie à laquelle ce stage est rattaché.

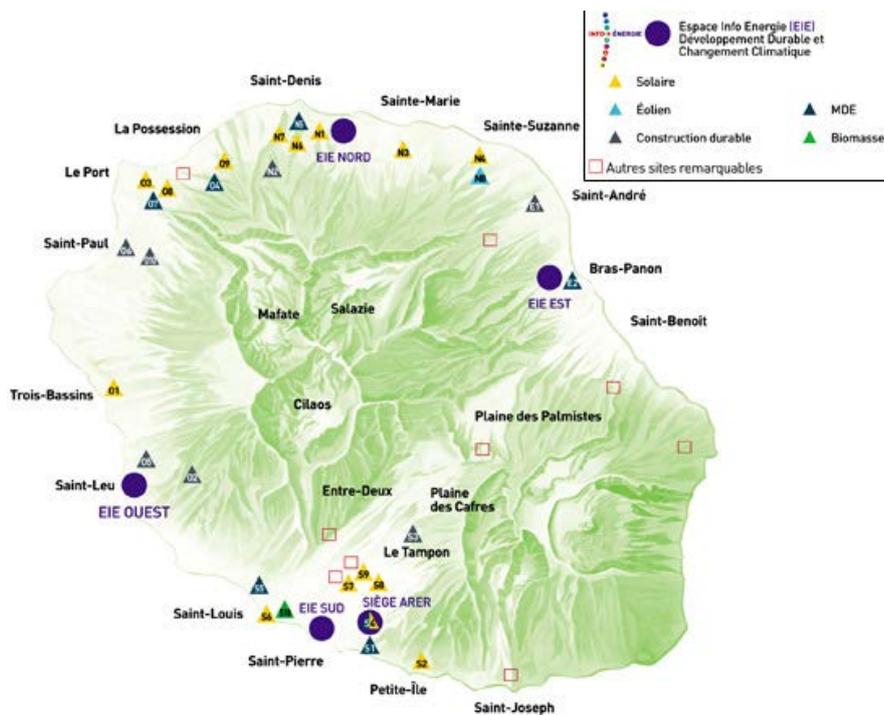


Figure 67 : Cartographie des principaux projets en cours

Comme l'indique la carte ci-dessus, les projets sur lesquels participe l'ARER sont répartis sur toute l'île et couvrent des domaines variés. Parmi ceux-ci, l'on pourrait citer les projets de gazéification bois dans les Cirques de Cilaos et Mafate notamment, le projet de climatisation urbaine marine sur Saint Denis, les projets de couplage agriculture – trackers solaires sur Saint Louis et la Plaine des Cafres, ou encore l'énergie thermique des mers au large du Port, voire les projets d'énergie houlomotrice dans plusieurs villes côtières (Saint Pierre, Saint Philippe entre autres). D'autres projets à plus ou moins long terme sont également travaillés à l'échelle de l'île, comme le transport solaire, ou la gazéification de la canne à sucre. Pour mener à bien ses missions, l'ARER a mis en place :

- ✓ Un réseau de sites démonstratifs représentatifs des technologies existantes à La Réunion.
- ✓ Un réseau d'Espaces Info Energies (EIE) à la disposition du grand public pour se renseigner sur les économies d'énergie et les énergies renouvelables.
- ✓ L'observatoire de l'Energie de la Réunion (OER),
- ✓ Une équipe technique et une méthodologie à la disposition des maîtres d'ouvrage pour les accompagner dans la mise en oeuvre de leur projet.
- ✓ Une banque d'outils pédagogiques (expositions, affiches, ...).
- ✓ Une base de données en constante valorisation : une ressource documentaire dans chaque agence et l'observatoire des technologies durables et des métiers de l'énergie.
- ✓ Une plate-forme d'information, d'éducation et de formation à l'utilisation rationnelle de l'énergie et aux technologies d'énergies renouvelables.
- ✓ Un service de conseil gratuit par téléphone et Internet.
- ✓ Un programme d'actions et de coopération internationale, inter îles « Island news », pour la mise en place de stratégies énergétiques durables.

L'ARER a par ailleurs étudié la faisabilité technique d'une électricité réunionnaise issue uniquement de ressources renouvelables, et les résultats obtenus font la part belle au photovoltaïque (30% de la production électrique en 2030 (1)).

ANNEXE K : PROJET VERT



Présentation :

Le projet VERT est porté par Renault, EDF, TOTAL, Groupe Bernard Hayot, GE Money dans le cadre d'un partenariat ayant pour objectif de réussir un déploiement significatif de véhicules électriques (VE), d'infrastructures de recharges (spots de charges) et des services clients utilisateurs associés sur l'île de la Réunion.

La déclaration d'intention a été signée le 19 janvier 2010 en présence du Président de la République à la Réunion et se déroulera en 2 étapes :

- une expérimentation (ou période préparatoire) en 2011,
- le lancement massif de VE sur l'île de la Réunion en 2012 dans les conditions normale du marché (vente en concessions des VE) : il s'agira ainsi d'une première mondiale.

Conscient de l'importance de proposer rapidement des offres combinées de production d'énergies renouvelables et de véhicules électriques face au réchauffement climatique et après les conclusions du sommet de Copenhague, les signataires souhaitent contribuer, à l'expérimentation à grande échelle de transports propres avec une signature carbone la plus faible possible. Les partenaires s'engagent sur les cinq objectifs suivants :

Objectif n°1 :

VERT vise à expérimenter le déploiement d'un réseau de recharge dédié pour véhicules électriques, suffisamment dimensionné en nombre et en types de charges (lente, rapide) pour permettre de répondre aux usages clients sur un territoire de taille réduite (distances courtes).

Objectif n°2 :

VERT doit permettre de tester des offres de mobilité électrique à la Réunion destinées aux flottes de véhicules, comme aux particuliers.

Objectif n°3 :

VERT doit permettre de proposer au public des véhicules ayant un « bilan CO2 » inférieur aux meilleurs véhicules thermiques et hybrides actuels. Dans cet esprit, il sera recherché pour chaque véhicule électrique mis en circulation à la Réunion, une solution ENR équivalente à sa consommation d'électricité.

Objectif n°4 :

VERT ambitionne de se positionner avec succès sur l'Appel à Manifestation d'Intérêt (AMI) de l'ADEME consacré aux infrastructures de recharge pour véhicules électriques.

Objectif n°5 :

Le projet d'expérimentation VERT doit permettre un retour d'expérience et une capitalisation qui pourront être transposés dans les pays et autres régions soumis aux mêmes contraintes de production électrique et pouvant recourir dans des conditions comparables aux énergies renouvelables.

ANNEXE L : CŒUR DU MODELE DE CALCUL MATLAB

```

%%%%%%%%%%%%Coeur du modele de calcul %%%%%%%%%%%%%
Nombre_iterations =
length(Pc_pv_min:Pc_pv_max)*length(E_batt_min:10:E_batt_max)*length(E_batt_peak_shaving_min:0.1:E_batt_peak_shaving_max);
k=1;
m=0;
for Pc_pv = Pc_pv_min:Incremen_pv:Pc_pv_max
  for E_batt = E_batt_min:Incremen_batt:E_batt_max
    for E_batt_peak_shaving = E_batt_peak_shaving_min:Incremen_peak_shaving:E_batt_peak_shaving_max
      Preel_champ      = Irradiation_simul*Pc_pv*0.6603/1000;
      Besoin_rech_parc_auto = Conso*Deplacements/100;
      Energie_PV_an      = trapz(Preel_champ)/60; % Quantité d'énergie PV produite par an au total
      Nbre_heure_equi    = Energie_PV_an/Pc_pv;
      % Dans cette boucle on découpe jour par jour les données de l'année pr
      % ensuite calculer l'énergie produite par jour par le PV
      Preel_champ_jr(1:Npj,1) = Preel_champ(1:Npj);
      Energie_PV_jr(1,1)     = trapz(Preel_champ_jr(:,1))/60;
      for n=2:365
        Preel_champ_jr(1:Npj,n) = Preel_champ(Npj*(n-1)+1:Npj*n);
        Energie_PV_jr(n,1)     = (trapz(Preel_champ_jr(:,n))/60)'; % Production PV journalière en kWh
      end
      %% Déroulement typique d'une journée %%
      Energie_batt_tampon_matin(1,1) = E_batt; % On suppose que la batterie tampon est installée chargée à
100%le premier jour d'utilisation
      for n=1:365
        %% Séquence que pasa en journée %%
        % Energie injectée dans la batterie tampon en fonction de l'énergie
        % produite en journée par le PV:
        if Energie_PV_jr(n,1)*Rdt_batt > E_batt - Energie_batt_tampon_matin(n,1) % equivaut à la quantité
d'énergie qu'il faut injecter à la batterie pr SOC = 100%, la batterie à cependant de l'énergie qu'il lui reste de la
veille
          Energie_PV_inject_reseau(n,1) = (Energie_PV_jr(n,1) - (E_batt -
Energie_batt_tampon_matin(n,1))/Rdt_batt)*Rdt_MPPT*Rdt_euro_onduleur; % On ne tiens pas compte du rdt
du reseau ici car l'énergie qui nous interesse est celle qui arrive au compteur de vente EDF
          Energie_batt_tampon_soir_avant_dech_VE(n,1) = E_batt; % Donc la batt est chargée a 100%
        else
          Energie_PV_inject_reseau(n,1) = 0;
          Energie_batt_tampon_soir_avant_dech_VE(n,1) = Energie_PV_jr(n,1)*Rdt_batt +
Energie_batt_tampon_matin(n,1); % Donc la batt est chargé à moins de 100%
        end
        %% Séquence que pasa le soir quand le VE est plugé %%
        % On prend l'hypothèse que le branchement du VE se fait le soir lorsque le
        % PV ne produit plus
        if Besoin_rech_parc_auto(n,1)/Rdt_VE > (Energie_batt_tampon_soir_avant_dech_VE(n,1) - (E_batt*(1
- DOD_max)))*Rdt_euro_onduleur % Si les besoins du véhicule sont supérieures à ce qu'on peut tirer de la
batterie (sans l'endomager)
          Energie_batt_tampon_soir_apres_dech_VE(n,1) = (1 - DOD_max)*E_batt;

```

```

Energie_pompe_reseau(n,1) = Besoin_rech_parc_auto(n,1)/Rdt_VE -
(Energie_batt_tampon_soir_avant_dech_VE(n,1) -
Energie_batt_tampon_soir_apres_dech_VE(n,1))*Rdt_euro_onduleur;
else
    Energie_batt_tampon_soir_apres_dech_VE(n,1) = Energie_batt_tampon_soir_avant_dech_VE(n,1) -
Besoin_rech_parc_auto(n,1)/Rdt_VE;
    Energie_pompe_reseau(n,1) = 0;
end
Energie_VE_apres_recharge(n,1) = Capa_VE; % On suppose également que le véhicule livré le 1er
jour est chargé à 100% // On force la recharge du VE ts les soirs à 100%
Autonomie_VE_apres_recharge(n,1) = Energie_VE_apres_recharge(n,1)*Autonomie/Capa_VE;
%% Séquence Peak Shaving
% On prend comme hypothèse que au maximum x% de l'énergie de la batterie
% peut être utilisée pr du peak shaving (a renseigner par
% l'utilisateur)
% On suppose pr l'instant que l'injection au reseau depuis la batterie
% tampon se fait après la recharge du VE à 100%
if Energie_batt_tampon_soir_apres_dech_VE(n,1)*Rdt_batt > E_batt*(1 - DOD_max +
E_batt_peak_shaving) % Si l'énergie restante dans la batt tampon après recharge des VE est supérieure à SOC
min + x% de peak shaving
    Energie_batt_inject_reseau(n,1) = E_batt_peak_shaving*E_batt*Rdt_euro_onduleur*Rdt_batt;
    Energie_batt_tampon_soir_apres_dech_reseau(n,1) =
Energie_batt_tampon_soir_apres_dech_VE(n,1) - Energie_batt_inject_reseau(n,1);
else
    Energie_batt_inject_reseau(n,1) = (Energie_batt_tampon_soir_apres_dech_VE(n,1) - (E_batt*(1 -
DOD_max)))*Rdt_euro_onduleur*Rdt_batt;
    Energie_batt_tampon_soir_apres_dech_reseau(n,1) = E_batt*(1 - DOD_max);
end
Energie_batt_tampon_matin(n+1,1) = Energie_batt_tampon_soir_apres_dech_reseau(n,1); % Energie
résiduelle avant le début de la recharge par le PV pr le jour d'après
end
Energie_batt_tampon_matin = Energie_batt_tampon_matin(1:365);
Rejet_CO2 = Energie_pompe_reseau./Deplacements*CO2_res; % Problème division par 0 pr les
déplacements le week end
for n = 1:365
    if isnan(Rejet_CO2(n)) == 1
        Rejet_CO2(n) = 0;
    end
end
end
Jour = (1:365);

%%%%%%%%%%%%%% XLSWRITE %%%%%%%%%%%%%%%

if scenario == 'Eco'
    nom_dis = {'Jour', 'Distance parcourue Vectrix x 2 [km]:',...
'Distance parcourue Kangoo [km]:',...
'Distance parcourue i-MiEV [km]:',...
'Distance parcourue Goupil [km]:',...
'Distance parcourue total du parc auto [km]:',...
'Besoins de recharge total [kWh]:',...
'Energie produite par PV [kWh]:',...

```

'Energie PV injectée au reseau [kWh]:',...
 'Energie de la batterie tampon avant décharge dans VE [kWh]:',...
 'Energie de la batterie tampon après décharge dans VE [kWh]:',...
 'Energie pompée depuis reseau [kWh]:',...
 'Energie du parc auto après sa recharge [kWh]:',...
 'Autonomie du parc auto après sa recharge [km]:',...
 'Energie de la batterie tampon injectée au réseau [kWh]:',...
 'Energie de la batterie tampon après décharge au reseau [kWh]:',...
 'Energie de la batterie tampon le matin [kWh]:',...
 'Bilan Carbone parc auto [gCO2/km]:');

data_dis=[Jour, Deplacements_Vectrix*2, Deplacements_Kangoo, Deplacements_iMiEV,
 Deplacements_Goupil, Deplacements, Besoin_rech_parc_auto,...

Energie_PV_jr, Energie_PV_inject_reseau,...
 Energie_batt_tampon_soir_avant_dech_VE,...
 Energie_batt_tampon_soir_apres_dech_VE,...
 Energie_pompe_reseau,...
 Energie_VE_apres_recharge,...
 Autonomie_VE_apres_recharge,...
 Energie_batt_inject_reseau,...
 Energie_batt_tampon_soir_apres_dech_reseau,...
 Energie_batt_tampon_matin,...
 Rejet_CO2];

elseif scenario == 'Pre'

nom_dis = {'Jour', 'Distance parcourue Vectrix x 2 [km]:',...
 'Distance parcourue Kangoo x 2 [km]:',...
 'Distance parcourue i-MiEV x 3 [km]:',...
 'Distance parcourue Goupil G3 [km]:',...
 'Distance parcourue total du parc auto [km]:',...
 'Besoins de recharge total [kWh]:',...
 'Energie produite par PV [kWh]:',...
 'Energie PV injectée au reseau [kWh]:',...
 'Energie de la batterie tampon avant décharge dans VE [kWh]:',...
 'Energie de la batterie tampon après décharge dans VE [kWh]:',...
 'Energie pompée depuis reseau [kWh]:',...
 'Energie du VE après sa recharge [kWh]:',...
 'Autonomie du VE après sa recharge [km]:',...
 'Energie de la batterie tampon injectée au réseau [kWh]:',...
 'Energie de la batterie tampon après décharge au reseau [kWh]:',...
 'Energie de la batterie tampon le matin [kWh]:',...
 'Bilan Carbone parc auto [gCO2/km]:');

data_dis=[Jour, Deplacements_Vectrix*2, Deplacements_Kangoo*2, Deplacements_iMiEV*3,
 Deplacements_Goupil, Deplacements, Besoin_rech_parc_auto,...

Energie_PV_jr, Energie_PV_inject_reseau,...
 Energie_batt_tampon_soir_avant_dech_VE,...
 Energie_batt_tampon_soir_apres_dech_VE,...
 Energie_pompe_reseau,...
 Energie_VE_apres_recharge,...
 Autonomie_VE_apres_recharge,...
 Energie_batt_inject_reseau,...
 Energie_batt_tampon_soir_apres_dech_reseau,...
 Energie_batt_tampon_matin,...

```

Rejet_CO2];
end
xlswrite([path0, '\Output_Simulation\', nom_simulation, '\Output_xls\Resultats.xls'],
cat(1,nom_dis,num2cell(data_dis)), sprintf('%s_%s_%dkWh_%dkWc_%gPS', scenario, batterie, E_batt, Pc_pv,
E_batt_peak_shaving*100), 'A1');
%% ATTENTION : modification de la fonction xlsread afin de pouvoir ecrire dans plusieurs worksheet
C'est la fonction flieattrib qui a été désactivée car elle ne renvoi rien
% Création sheet statistique
nom_dis = {'Distance parcourue total du parc auto [km]:',...
'Besoins de recharge total [kWh]:',...
'Energie produite par PV [kWh]:',...
'Energie PV injectée au reseau [kWh]:',...
'Energie de la batterie tampon avant décharge dans VE [kWh]:',...
'Energie de la batterie tampon après décharge dans VE [kWh]:',...
'Energie pompée depuis reseau [kWh]:',...
'Energie du VE après sa recharge [kWh]:',...
'Autonomie du VE après sa recharge [km]:',...
'Energie de la batterie tampon injectée au réseau [kWh]:',...
'Energie de la batterie tampon après décharge au reseau [kWh]:',...
'Energie de la batterie tampon le matin [kWh]:',...
'Bilan Carbone parc auto [gCO2/km]:'};
data_min=[Deplacements, Besoin_rech_parc_auto,...
Energie_PV_jr, Energie_PV_inject_reseau,...
Energie_batt_tampon_soir_avant_dech_VE,...
Energie_batt_tampon_soir_apres_dech_VE,...
Energie_pompe_reseau,...
Energie_VE_apres_recharge,...
Autonomie_VE_apres_recharge,...
Energie_batt_inject_reseau,...
Energie_batt_tampon_soir_apres_dech_reseau,...
Energie_batt_tampon_matin,...
Rejet_CO2];
data_min=min(data_min);
data_max=[Deplacements, Besoin_rech_parc_auto,...
Energie_PV_jr, Energie_PV_inject_reseau,...
Energie_batt_tampon_soir_avant_dech_VE,...
Energie_batt_tampon_soir_apres_dech_VE,...
Energie_pompe_reseau,...
Energie_VE_apres_recharge,...
Autonomie_VE_apres_recharge,...
Energie_batt_inject_reseau,...
Energie_batt_tampon_soir_apres_dech_reseau,...
Energie_batt_tampon_matin,...
Rejet_CO2];
data_max=max(data_max);
data_mean=[Deplacements, Besoin_rech_parc_auto,...
Energie_PV_jr, Energie_PV_inject_reseau,...
Energie_batt_tampon_soir_avant_dech_VE,...
Energie_batt_tampon_soir_apres_dech_VE,...
Energie_pompe_reseau,...
Energie_VE_apres_recharge,...

```

```

Autonomie_VE_apres_recharge,...
Energie_batt_inject_reseau,...
Energie_batt_tampon_soir_apres_dech_reseau,...
Energie_batt_tampon_matin,...
Rejet_CO2];
data_mean=mean(data_mean);
data_std=[Deplacements, Besoin_rech_parc_auto,...
    Energie_PV_jr, Energie_PV_inject_reseau,...
    Energie_batt_tampon_soir_avant_dech_VE,...
    Energie_batt_tampon_soir_apres_dech_VE,...
    Energie_pompe_reseau,...
    Energie_VE_apres_recharge,...
    Autonomie_VE_apres_recharge,...
    Energie_batt_inject_reseau,...
    Energie_batt_tampon_soir_apres_dech_reseau,...
    Energie_batt_tampon_matin,...
    Rejet_CO2];
data_std=std(data_std);
stat = {''; 'minimum'; 'maximum'; 'moyenne'; 'ecart-type'};
xlswrite([path0, '\Output_Simulation\', nom_simulation, '\Output_xls\Statistiques.xls'],
cat(2,stat,cat(1,nom_dis,num2cell(data_min),num2cell(data_max),num2cell(data_mean),num2cell(data_std))),
sprintf('%s_%s_%dkWh_%dkWc_%gPS', scenario, batterie, E_batt, Pc_pv, E_batt_peak_shaving*100), 'A1');
    En_tete = {'', 'Moyenne gCO2/km', 'Bilan CO2 du projet incluant énergie grise et fret de la marchandise
(tCO2)'};
    xlswrite([path0, '\Output_Simulation\', nom_simulation, '\Output_xls\Analyse_CO2.xls'], En_tete,
sprintf('%s', nom_simulation), 'A1');
    xlswrite([path0, '\Output_Simulation\', nom_simulation, '\Output_xls\Analyse_CO2.xls'], cat(2,{'Tonnes
de CO2 sur la durée du projet pour un parc équivalent thermique en tenant compte de l"import du
carburant'},num2cell((Km_VT_Diesel*CO2_Diesel + Km_VT_SP*CO2_SP)*n/1000000 +
CO2_import_carburant)), sprintf('%s', nom_simulation), 'H5');
    k = k+1;
    xlswrite([path0, '\Output_Simulation\', nom_simulation, '\Output_xls\Analyse_CO2.xls'], cat(2, {[scenario,
'_', batterie, '_', num2str(E_batt), 'kWh_', num2str(Pc_pv), 'kWc_' num2str(E_batt_peak_shaving*100), '%Peak
Shaving' ]},num2cell(data_mean(13)), num2cell(sum(Rejet_CO2)*n/1000000+Total_CO2_projet_elec)),
sprintf('%s', nom_simulation), ['A', num2str(k)]);
    %% Depouillement des résultats
    % Sollicitation de la batterie tampon
    Energie_moyenne_injectee_peak_shaving = sum(Energie_batt_inject_reseau)/(E_batt*365);
    % Répartition de l'énergie solaire reçu
    Rejet_CO2_moy = Rejet_CO2/365;

    Part_prod_PV_inject_reseau_journee = sum(Energie_PV_inject_reseau)/sum(Energie_PV_jr);
    Part_prod_PV_peak_shaving = sum(Energie_batt_inject_reseau)/sum(Energie_PV_jr);
    Part_prod_PV_TST = sum(abs(Energie_batt_tampon_matin -
Energie_batt_tampon_soir_avant_dech_VE))/sum(Energie_PV_jr);

    %%%%%%%%%%%%% PLOT %%%%%%%%%%%%%

jj=figure;
set(gcf, 'Name', 'Repartition moyenne de l'énergie solaire', 'Position', [20 90 1200 700])
x = [Part_prod_PV_inject_reseau_journee Part_prod_PV_peak_shaving Part_prod_PV_TST];

```

```

pie(x,{'% energie PV injectée au reseau en journée','% energie PV utilisée en Peak Shaving','% energie PV
utilisée pour le TST'})
colormap jet
title('Répartition moyenne de l'énergie solaire')
saveas(jj, [path0, '\Output_Simulation\', nom_simulation,
'\Output_Graph\Repartition_production_PV.bmp'])
saveas(jj, [path0, '\Output_Simulation\', nom_simulation,
'\Output_Graph\Repartition_production_PV.fig'])
% Représentation des flux réseau et bilan carbone qui en découle
jj=figure;
set(gcf, 'Name', 'Représentation des flux réseau et bilan carbone qui en découle', 'Position', [20 90 1200
700])
ex(1)=subplot(3,1,1); plot(Jour,Energie_PV_inject_reseau,'r','LineWidth', 2); title('Energie PV injectée
directement au réseau'); xlabel('Jour'); ylabel('kWh');
ex(2)=subplot(3,1,2); plot(Jour,Energie_pompe_reseau,'r','LineWidth', 2); title('Energie pompée sur le
réseau'); xlabel('Jour'); ylabel('kWh');
ex(3)=subplot(3,1,3); plot(Jour,Rejet_CO2,'r','LineWidth', 2); title('Bilan carbone du parc auto');
xlabel('Jour'); ylabel('gCO2/km');
linkaxes(ex,'x');
saveas(jj, [path0, '\Output_Simulation\', nom_simulation,
'\Output_Graph\Représentation_des_flux_réseau_et_bilan_carbone.bmp'])
saveas(jj, [path0, '\Output_Simulation\', nom_simulation,
'\Output_Graph\Représentation_des_flux_réseau_et_bilan_carbone.fig'])

```

%%%%%%%%%%%% Analyse ECO %%%%%%%%%%

```

for Si = Si_min:Incrmen_Si:Si_max
% L'étude ECO qui va suivre se base sur des données recueillis pr le parc thermique pr l'année 2009
%% Partie Batt %%
I_batt_bis= I_batt_kWh*E_batt;
I_batt = I_batt_bis*(Remplacement+1);
% Iu_batt = I_batt/P_batt; %Coût d'investissement par kW installé
Dem_batt = Kem_batt*I_batt;
Ea_batt = sum(Energie_batt_inject_reseau);
%% Partie Onduleur %%
if batterie == 'Cube'
I_ond = 0;
elseif batterie == 'Plom'
Nombre_onduleur = ceil(Pc_pv/(P_onduleur/1000));
if onduleur == 'STECA';
I_ond = 4000*Nombre_onduleur;
elseif onduleur == 'SUNNY';
I_ond = 5000*Nombre_onduleur;
end
end
%% Partie PV %%
I_pv = Cout_achat_pv*Pc_pv*1000 + Cout_instal_pv*Pc_pv*1000 + Cout_raccor_pv - I_ond; % On
retranche le prix des onduleurs car il est calculé à part
Iu_pv = I_pv/(Pc_pv*1000); %Coût d'investissement par kW installé
Dem_pv = Kem_pv*I_pv;
Ea_pv = sum(Energie_PV_inject_reseau);

```



```

%% Partie VE %%
I_VE = Prix_VE - Bonus_VE;
DV_e_HT = sum(Energie_pompe_reseau)*(Prix_elec_grise+0.0045);
DV_e = DV_e_HT + 0.11 * DV_e_HT; % Séquence de calcul du prix de revient TTC de l'élec grise
consommé pr la recharge des VE; on estime la taxe à appliquer de 11%
%% Partie Borne de recharge %%
if batterie == 'Cube'
    I_borne = 0;
elseif batterie == 'Plom'
    if scenario == 'Eco'
        I_borne = Prix_borne_bis*3;
    elseif scenario == 'Pre'
        I_borne = Prix_borne_bis*4;
    end
end
%% Partie VT %%
DV_Diesel = Km_VT_Diesel*Conso_VT_Diesel*Prix_Diesel;
DV_SP = Km_VT_SP*Conso_VT_SP*Prix_SP;
Dem_VT = Km_VT_Diesel*Cout_km_Diesel + Km_VT_SP*Cout_km_SP;
%% Centralisation des variables projet VE
% Lettre E pr scenario Econome en énergie
I_Ebis = I_pv + I_batt + I_VE + I_ond + I_borne;
I_E = I_Ebis + MOE*I_Ebis - Si*I_Ebis;
Dem_E = Dem_batt + Dem_pv + Dem_VE + Location_batt*12; % Dépenses pr la maintenance et
l'exploitation par an
Da_E = Dem_E + DV_e; % Dépense annuelle total
Ea_E = Ea_batt + Ea_pv; % Energie annuelle revendue à EDF; aussi appelé Qa
Nh_pv = Nbre_heure_equi;
Ra_E = TV_batt*Ea_batt + TV_pv*Ea_pv; % Recettes annuelles
CF_E = Ra_E - Da_E; % Cash Flow annuel AVANT IMPOTS SUR LES BENEFICES
VAN_E = -I_E + CF_E/Ka; % Valeur actuelle nette
Cout_km_E = (I_E - CF_E*an)/ ((Km_VT_Diesel+Km_VT_SP)*an); % On tient compte de l'ensemble
du projet pr calculer le cout/km
%% Centralisation des variables projet thermique
% Lettre C pr scenario conventionnel
if scenario == 'Eco'
    I_C = 70166;
elseif scenario == 'Pre'
    I_C = 126764;
end
Dem_C = Dem_VT;
Da_C = Dem_C + DV_Diesel + DV_SP + TV_S;
Ra_C = 0;
CF_C = Ra_C - Da_C;
VAN_C = -I_C + CF_C/Ka;
Cout_km_C = (I_C - CF_C*an)/ ((Km_VT_Diesel+Km_VT_SP)*an);
%% Rentabilité différentiel
dVAN = VAN_E - VAN_C;
dTEC = dVAN / (I_E - I_C);
TEC_E = VAN_E / I_E;
TEC_C = VAN_C / I_C;

```



```

xlswrite([path0, '\Output_Simulation\', nom_simulation, '\Output_xls\Analyse_Eco.xls'], En_tete,
sprintf('%s_Ecologique', nom_simulation), 'A1');

xlswrite([path0, '\Output_Simulation\', nom_simulation, '\Output_xls\Analyse_Eco.xls'],
cat(2, {[scenario, '_ ', batterie, '_ ', num2str(E_batt), 'kWh_', num2str(Pc_pv), 'kWc_'
num2str(E_batt_peak_shaving*100), '%Peak Shaving_', num2str(Si*100), '%Subventions']}), num2cell(dVAN),
num2cell(VAN_E), num2cell(dTEC), num2cell(TEC_E), num2cell(Cout_km_E), num2cell(DV_e/1000),
num2cell(Ra_E/1000), num2cell(Da_E/1000), num2cell(CF_E/1000), num2cell(I_Ebis/1000),
num2cell(I_VE/1000), num2cell(I_pv/1000), num2cell(I_batt/1000), num2cell(I_ond/1000),
num2cell(I_borne/1000), num2cell(Si*I_Ebis/1000), num2cell(I_E/1000)), sprintf('%s_Ecologique',
nom_simulation), ['A', num2str(k+m)]);

En_tete_bis = {'TEC', 'VAN', 'Coût au km (€/km)', 'Dépense annuelle (k€)', 'Cash Flow annuel (k€)',
'Total Investissements (k€)'};

xlswrite([path0, '\Output_Simulation\', nom_simulation, '\Output_xls\Analyse_Eco.xls'], En_tete_bis,
sprintf('%s_Fossil', nom_simulation), 'A1');

xlswrite([path0, '\Output_Simulation\', nom_simulation, '\Output_xls\Analyse_Eco.xls'], cat(2,
num2cell(TEC_C), num2cell(VAN_C), num2cell(Cout_km_C), num2cell(Da_C/1000), num2cell(CF_C/1000),
num2cell(I_C/1000)), sprintf('%s_Fossil', nom_simulation), 'A2');

%% Stockage matrice
Matrice_Cout_km_E(1) = 0;
Matrice_Cout_km_E(m+1) = Cout_km_E;
Matrice_nom(1) = {'Scenario ', scenario, ' Fossil'};
Matrice_nom(m+1) = {[scenario, ' ', batterie, ' ', num2str(E_batt), 'kWh ', num2str(Pc_pv), 'kWc '
num2str(E_batt_peak_shaving*100), '%Peak Shaving ', num2str(Si*100), '%Subventions']};
Matrice_dTEC(1) = 0;
Matrice_dTEC(m+1) = dTEC;
Matrice_dVAN(1) = 0;
Matrice_dVAN(m+1) = dVAN;
Matrice_TEC_E(1) = 0;
Matrice_TEC_E(m+1) = TEC_E;
Matrice_VAN_E(1) = 0;
Matrice_VAN_E(m+1) = VAN_E;
Matrice_CO2_VE(1) = 0;
Matrice_CO2_VE(m+1) = data_mean(13);

%% Rentabilité du projet
if dTEC < 0
    warndlg('Le projet électrique est moins rentable que le projet fossil', '!! Info !!')
else
    warndlg('Le projet électrique est plus rentable que le projet fossil', '!! Info !!')
end
end
end
end
end
end

```