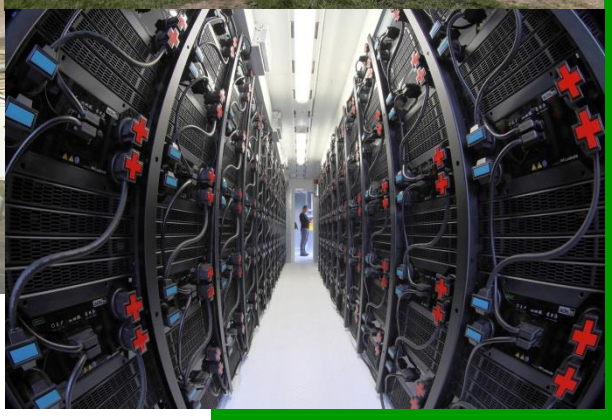
Cour des comptes
du Canton de Vaud

Domaine C du programme
« 100 millions pour les énergies renouvelables et l'efficacité énergétique »

Audit de deux projets de recherche gérés par les Hautes Ecoles vaudoises



Rapport n° 42

du 29.11.2017

Cour des comptes du Canton de Vaud
Rue Langallerie 11 - 1014 Lausanne
Téléphone : 021 316 58 00
Courriel : info.cour-des-comptes@vd.ch

A des fins de concision, il n'a pas été systématiquement procédé à la féminisation de la terminologie. Cependant, de manière générale, la désignation de personne, de statut, de fonction ou de profession utilisée dans le présent document peut s'appliquer indifféremment aux femmes et aux hommes.

Photos de couverture :

Photos avec droits limités :

- Extérieur et intérieur du container de stockage d'électricité : © Alain Herzog / EPFL
- Unité pilote de torréfaction, plaquettes et pellets de bois torréfié: © Granit Technologies and Engineering (GRT) SA

RÉSUMÉ

AUDIT D'EFFICACITÉ DE SUBVENTIONS OCTROYÉES À DEUX PROJETS DE RECHERCHE

Introduction

Dans le cadre du programme des « *100 millions pour les énergies renouvelables et l'efficacité énergétique* », le domaine C, qui représente environ CHF 13 mios, a pour buts le développement des nouvelles énergies renouvelables et le soutien à l'économie locale. Les neuf projets subventionnés ont été sélectionnés sur la base de critères fixés par le Conseil d'Etat : il devait s'agir de projets menés par des Hautes Ecoles vaudoises, se trouvant en stade de développement avancé ou en phase de production de prototypes, pouvant générer des affaires dans les entreprises, start-ups ou spin-offs vaudoises.

Il convient de préciser que la décision du Conseil d'Etat de subventionner ces projets de recherche était assortie de la réserve suivante : « De par la nature même de la recherche, même appliquée, une garantie absolue ne peut être fournie quant aux résultats finaux et donc aux retombées économiques ou aux effets multiplicateurs (…) ».

La Cour des comptes a décidé d'auditer les deux projets les plus importants, EPFL – « Système pilote de stockage d'énergie de 500 kWh pour le contrôle des réseaux électriques avec génération distribuée » (appelé par souci de simplification « projet Leclanché ») et HEIG-VD – Torplant, subventionnés par le Canton à hauteur de respectivement CHF 1.97 mios et 2.1 mios versés en tranches selon un calendrier préétabli aux Hautes Ecoles, lesquelles ont conclu des contrats avec des partenaires privés.

Au sens de la LCComptes, il s'agit d'un audit portant sur l'efficacité des subventions engagées dans ces deux projets, soit l'atteinte des objectifs de chacun des deux projets eux-mêmes afin d'examiner dans quelle mesure ils contribuent aux objectifs du volet C dans son ensemble. La question principale d'audit a ainsi été formulée de la manière suivante : *Les subventions aux projets HEIG-VD – Torplant et EPFL – Leclanché contribuent-t-elles à l'atteinte des objectifs de développement des énergies renouvelables et de soutien du tissu économique vaudois ?* Le respect du principe de durabilité qui figure dans les missions de la LCComptes a également été traité sous l'angle des impacts environnementaux des deux projets.

Ce premier audit sur des projets de recherche a notamment conduit la Cour à examiner un grand nombre de rapports techniques, visiter les deux installations de même que rencontrer les porteurs de projets et responsables techniques des entreprises partenaires.

La Cour des comptes a décidé d'auditer le programme des « *100 millions pour les énergies renouvelables et l'efficacité énergétique* ». Il s'agit du deuxième rapport de la Cour, le premier portant sur l'efficacité des subventions pour l'assainissement des bâtiments et les audits des grands consommateurs.

RÉSULTATS DE L'AUDIT

EPFL – LECLANCHE

Le projet EPFL – Leclanché, qui a atteint tous ses objectifs, peut être considéré comme une réussite. En favorisant le développement des nouvelles énergies renouvelables spontanément variables, comme le photovoltaïque et l'éolien, et en ayant un impact positif sur l'économie locale, il s'inscrit pleinement dans les objectifs du domaine C du programme des 100 mios.

Objectifs du projet

Le but de ce projet est de répondre au plus grand défi de l'industrie électrique pour les prochaines décennies que constitue le stockage d'énergie, indispensable en vue d'une exploitation optimale des ressources énergétiques renouvelables intermittentes. En effet, la production de courant photovoltaïque ou éolien dépend des conditions météorologiques et elle ne peut donc pas être régulée, ni sur le plan temporel, ni sur le plan quantitatif. Si elle ne coïncide pas avec la demande, il faut soit adapter la consommation d'électricité à la production, soit stocker l'énergie inutilisée, soit faire appel à d'autres sources de production. Afin de garantir la sécurité du réseau, l'équilibre doit être assuré non seulement entre les saisons ou d'un jour à l'autre mais en permanence. Des solutions de stockage permettant de corréler la demande à l'offre doivent donc être développées et nécessitent des investissements dans la recherche et le développement.

Le projet EPFL – Leclanché a consisté à développer un démonstrateur incluant un système de stockage électrique, sous la forme d'une batterie lithium-ion titanate de 500 kWh/500 kW gérée par des algorithmes permettant d'optimiser le système de stockage afin de compenser les flux de puissance résultant de la production décentralisée d'une partie du parc photovoltaïque de 15'000 m^2 de Romande Energie – EPFL. Ce démonstrateur a pour but de servir de plateforme opérationnelle pour l'exploitation optimale des ressources renouvelables (en particulier le photovoltaïque) et leur intégration dans les réseaux électriques de distribution en moyenne tension.

Les objectifs du projet étaient les suivants :

- réalisation du système de stockage pilote : container intégré commercialisable en l'état comportant un ensemble de modules lithium-ion titanate intégrés, ainsi que différents logiciels d'exploitation ;
- développement d'un système de collecte des informations et estimation d'état en temps réel du moyen de maintenir une continuité du courant (*feeder*) du réseau électrique de l'EPFL auquel le système de stockage est connecté ;
- définition des algorithmes de gestion des systèmes de stockage pour l'écrêtage de pointes et les services système (réglage de tension du *feeder* et gestion de congestion dans les lignes) ;
- évaluation des prestations du système de stockage pour l'écrêtage du système et les services systèmes.

Ce projet ne portait pas sur le développement d'une technique nouvelle (la batterie utilisée pour le stockage existait déjà), mais sur l'étude du comportement de cette batterie dans la configuration particulière où elle fonctionne comme élément de régulation du réseau (charge/décharge), notamment pour observer le nombre de cycles et l'effet sur le vieillissement des cellules. Il portait également sur le développement de son utilisation au travers de logiciels permettant de piloter le stockage de l'énergie renouvelable sujette à des variations rapides et importantes.

Résultats de l'audit

Ce projet a abouti à la construction d'un système pilote qui fonctionne et sert de base tant à la recherche qu'à la démonstration de la maîtrise du stockage et de sa conduite pour la sécurité des lignes de distribution électrique. Les tests prévus dans le cadre du projet ont été effectués et ont confirmé le bon fonctionnement du dispositif. Le système permet de faire des prévisions de production et d'adapter le comportement (stockage/déstockage/neutre) de la batterie et participe à la résolution d'une partie des problèmes liés à la production fluctuante d'électricité solaire (ou éolienne). Cette technologie peut contribuer à assurer la stabilité du réseau alors que la proportion des énergies renouvelables augmente dans le mix électrique. Au niveau des connaissances, beaucoup de savoirs et de savoir-faire nouveaux ont été créés grâce à ce projet, dont une bonne partie publique, et un brevet a pu être déposé.

Au niveau du développement économique local, ce projet s'avère être très positif pour les trois acteurs : les impacts sur l'économie sont des investissements pour plus de CHF 1.5 mios dans le canton pour l'installation d'une ligne de production de modules de batteries, l'ouverture de marchés pour Leclanché et l'engagement de plus de 40 collaborateurs, dont plus de la moitié dans le canton, ainsi que la création de deux start-ups liées à l'EPFL. Pour Romande Energie, ce projet est un pas vers la maîtrise du stockage de l'électricité comme technique de sécurisation du réseau dans le futur.

Ce projet a connu un grand rayonnement international, ce qui est très favorable pour tous les partenaires impliqués et pour le Canton de Vaud comme acteur important de l'innovation. L'intérêt de l'installation réalisée réside dans le fait qu'il s'agit d'une vitrine technologique et d'un laboratoire où l'EPFL, Leclanché ainsi que Romande Energie peuvent tester en grandeur nature les bénéfices du système de stockage développé.

Une évaluation des impacts environnementaux, notamment sous forme d'une analyse du cycle de vie (ACV), n'était pas prévue dans le cadre de ce projet mais devrait être effectuée, au moins sur la batterie. Les impacts négatifs occasionnés par les composants de cette batterie sont à mettre en parallèle avec les impacts positifs découlant du système de gestion développé (meilleure valorisation des énergies renouvelables).

HEIG-VD – TORPLANT

Le projet HEIG-VD – Torplant n'a pas atteint ses objectifs ; les risques importants, identifiés avant le démarrage du projet, se sont pour la plupart réalisés. Pour l'heure, les essais de production de chaleur et d'électricité ne sont pas concluants. A ce stade, il ne remplit pas l'objectif de développement des énergies renouvelables fixé tant pour le projet (production de

pellets torréfiés, de chaleur et électricité) que pour le domaine C. En revanche, l'objectif d'impact sur l'économie locale est rempli car l'unité pilote a été « co-construite » par la HEIG-VD et une entreprise vaudoise, avec la participation d'un troisième partenaire basé en Suisse alémanique.

Objectifs du projet

Le but de ce projet était de produire un combustible renouvelable, rentable économiquement, à partir de ressources locales, et d'intégrer au procédé de production des catégories de biomasse non valorisées énergétiquement à ce jour (déchets verts, branchages, rebus d'exploitation forestière, rebus de menuiserie, rebus d'entretien des routes, …). L'intérêt attendu de la torréfaction des pellets, en plus de la possibilité d'utiliser certaines catégories de biomasse non valorisées, était notamment d'augmenter leur densité énergétique et de les rendre hydrophobes, afin de réduire leurs coûts de transport et de stockage.

Sur la base de résultats obtenus grâce à un prototype de 5 kg/h, réalisé précédemment par la HEIG-VD, il s'agissait de construire un système pilote de torréfaction de biomasse d'une capacité nominale de 100 kg/h, commercialisable. L'objectif était de produire principalement des pellets torréfiés (pour le chauffage) mais également de la chaleur et de l'électricité (par la valorisation du gaz de torréfaction, le Torgaz). Les clients prévus étaient d'une part les réseaux de chauffage urbains, les chauffages industriels et d'autre part les chauffages individuels.

Les objectifs du projet étaient les suivants :

- autonomie de fonctionnement de l'unité pilote de capacité nominale de 100 kg/h ;
- acceptation des pellets torréfiés par le marché ;
- prix de revient des pellets torréfiés satisfaisant ;
- bilan économique global positif ;
- technique de valorisation du Torgaz par production de chaleur et d'électricité.

Résultats de l'audit

Le projet, d'une grande complexité technique, sous-estimée en ce qui concerne en particulier l'interface entre le torréfacteur et le système pour produire de l'énergie grâce au Torgaz, a été en proie à d'importantes difficultés techniques. D'une durée prévue de 40 mois, il a été prolongé de 5 mois pour permettre la mise au point du torréfacteur et la réalisation d'essais dont seule une partie a pu être effectuée.

Les résultats obtenus montrent que les objectifs n'ont pas été atteints, notamment en termes d'autonomie de fonctionnement et de rendement de l'installation pilote. Alors que le débit attendu était de 100 kg/h pendant 120 h en continu, le débit maximal réalisé lors des essais de torréfaction a été de 61 kg/h pendant 34 h en continu sous supervision. Le système n'est pas suffisamment stabilisé pour gérer des variations d'humidité importantes de la matière entrante.

La technique de valorisation du Torgaz par production de chaleur et d'électricité, qui constituait une exigence de base pour financer ce projet, n'est pas validée et s'avère d'un potentiel marginal.

Quant à l'acceptation des pellets torréfiés par le marché, qui constituait un des résultats attendus du projet, elle n'a pu être évaluée, aucune production de pellets torréfiés n'ayant eu lieu.

Concernant l'objectif de prix de revient satisfaisant visé pour les pellets, il est fortement dépendant du coût des matières entrantes. Si des déchets de bois sont utilisés à un prix négatif (ceux qui les produisent paient pour s'en débarrasser), cela devient intéressant financièrement mais risque de perturber la qualité du produit final. Cela ne suffira vraisemblablement pas car, même à coûts entrants faibles ou nuls, selon des études économiques réalisées dans le cadre du projet, il faudrait encore porter la capacité de l'installation à au moins 500 kg/h durant quelque 7'000 heures par an, pour atteindre le seuil de rentabilité, ce qui est largement supérieur à la capacité atteinte, en l'état actuel de mise au point de l'unité pilote, de 61 kg/h. Des développements techniques conséquents sont donc encore nécessaires pour rendre le système commercialisable, avec de nouveaux tests sur les plaquettes ou les pellets torréfiés. La viabilité d'un tel projet dépend des éléments susmentionnés mais également, de manière générale, du prix de vente des produits torréfiés, qui doit être concurrentiel avec les produits non torréfiés et les autres combustibles dont le prix actuel est bas et n'est pas propice à la mise sur le marché de solutions innovantes pour la bioénergie. Quant à l'objectif qui était d'atteindre un bilan économique global positif, il est trop tôt pour se prononcer en l'état des développements techniques actuels.

Concernant la durabilité, la technologie développée, en l'état actuel de mise au point du pilote, ne permet pas de respecter les normes en vigueur (notamment émissions du torréfacteur non conformes à l'OPair).

Au niveau du développement économique local, ce projet s'avère positif. L'entreprise vaudoise partenaire du projet a délégué un ingénieur qui a travaillé à la construction de l'unité pilote pendant trois ans. La HEIG-VD souligne que ce projet a contribué au développement de sa position de leader en Suisse pour la R&D dans le domaine de la bioénergie et lui a permis de se faire connaître comme centre d'expertise au niveau européen.

Le principal intérêt de la torréfaction est de faciliter le stockage et le transport de la biomasse rendue plus dense et hydrophobe. A ce titre, il conviendrait d'effectuer une analyse du cycle de vie (ACV) complète du kWh produit grâce aux plaquettes ou pellets torréfiés en comparaison avec la biomasse séchée et sous les mêmes formes. Il est important de prendre en considération l'ensemble des valorisations possibles de la biomasse pour s'assurer que l'utilisation de cette matière dans la filière énergétique ne se fait pas au détriment d'autres usages.

En conclusion, on peut constater a posteriori que les objectifs de ce projet sur trois ans étaient trop ambitieux, notamment de vouloir faire à la fois une version plus grande du pilote (passage de 5 à 100 kg/h) et de valoriser thermo-électriquement le Torgaz (couplage du système sécheur-torréfacteur avec la turbine à gaz).

Les résultats précités montrent que, malgré une analyse préalable du projet lors de la mise en œuvre du « programme 100 millions », le projet Torplant était trop éloigné de la commercialisation pour répondre aux critères initiaux (projets en stade de développement avancé ou en phase de production de prototypes, pouvant générer des affaires dans les

entreprises, start-ups ou spin-offs vaudoises) fixés à juste titre par le Conseil d'Etat pour sélectionner des projets et en limiter les risques.

Enfin, la DGE-DIREN a mis en place un système de contrôle permettant de suivre de manière rigoureuse l'avancement de ces projets très particuliers, tant du point de vue financier que scientifique. Dans ce cas précis de Torplant, sauf à mettre un terme au financement du projet et donc de perdre l'investissement consenti, la DGE-DIREN n'avait pas de moyens d'action.

CONSTATATIONS ET RECOMMANDATIONS

La Cour des comptes a émis, pour les projets à venir, cinq recommandations visant à l'efficacité des subventions versées, à une meilleure prise en compte des impacts environnementaux dans les projets et à une cohérence de la politique cantonale en matière de valorisation de la biomasse. Elle recommande en particulier lors de décisions de subventionnement, de se fonder sur des objectifs de projets et une planification réalistes et un niveau de risques acceptable, en étant conscients des difficultés inhérentes aux projets de recherche. Concernant la durabilité, elle recommande d'examiner la pertinence d'effectuer une analyse du cycle de vie (ACV) afin d'identifier les éventuels aspects négatifs des projets et tenter de les minimiser.

L'audit montre que subventionner des projets de recherche ayant pour objectif de développer les énergies renouvelables, en fixant comme objectif supplémentaire le soutien à l'économie vaudoise par les Hautes Ecoles, a engendré des tensions entre eux. Cette double exigence a constitué un cadre particulièrement contraignant, alors que la recherche nécessite par définition la plus grande ouverture possible.

Enfin, il convient de relever cette manière nouvelle et originale lancée par le Conseil d'Etat de soutenir en même temps l'innovation, les Hautes Ecoles et le tissu économique. Cela a permis de rapprocher les acteurs publics et privés et de fournir très en amont des conseils en matière de commercialisation, d'innovation et de transfert de technologie, ce qui constituait une démarche nouvelle pour les milieux académiques.

REMERCIEMENTS

Au terme de ses travaux, la Cour des comptes tient à remercier toutes les personnes qui lui ont permis de réaliser cet audit. Elle souligne la disponibilité de ses interlocuteurs et interlocutrices, de même que la diligence et le suivi mis à la préparation et à la fourniture des documents et des données requis.

Ces remerciements s'adressent notamment aux cadres et collaborateurs de la Direction générale de l'environnement (DGE) et en particulier à la Direction de l'énergie (DIREN). La Cour remercie également les porteurs de projet ainsi que leurs partenaires (l'EPFL, la HEIG-VD, Leclanché SA et Granit Technologies and Engineering (GRT) SA), qui ont reçu l'équipe d'audit, pour leur disponibilité et la qualité des échanges.

TABLE DES MATIÈRES

Liste des tableaux 3
Liste des figures 3
Liste des principales abréviations utilisées 5
Glossaire 6
1. Le domaine audité 10
1.1. Le programme des 100 millions 10
1.2. Les projets de recherche – Domaine C 12
1.3. Le projet EPFL – Leclanché 17
1.4. Le projet HEIG-VD – Torplant 22
2. L'objectif et l'approche de l'audit 30
2.1. L'étendue 30
2.2. L'objectif de l'audit 30
2.3. Les axes de l'audit 31
2.4. L'approche 32
3. Les résultats de l'audit : Projet EPFL – Leclanché 36
3.1. Le pilotage du projet 36
3.1.1. Le cadre contractuel 36
3.1.2. Les objectifs 36
3.1.3. Le suivi du projet et le contrôle des résultats 38
3.2. La contribution au développement des énergies renouvelables 45
3.2.1. L'amélioration de la technologie 45
3.2.2. La contribution de cette technologie au développement des énergies renouvelables 46
3.2.3. Les produits commercialisables 48
3.2.4. Les impacts environnementaux 49
3.3. Le soutien du tissu économique vaudois 51
4. Les résultats de l'audit : Projet HEIG-VD – Torplant 55
4.1. Le pilotage du projet 55
4.1.1. Le cadre contractuel 55
4.1.2. Les objectifs 56

4.1.3. Le suivi du projet et le contrôle des résultats 59
4.2. La contribution au développement des énergies renouvelables 65
4.2.1. L'innovation développée 65
4.2.2. La contribution de cette technologie au développement des énergies renouvelables 66
4.2.3. Les produits commercialisables 68
4.2.4. Les impacts environnementaux 71
4.3. Le soutien du tissu économique vaudois 74
5. Réponse à la question principale d'audit, constatations et recommandations 77
6. Remarques de l'entité auditée 84
Annexes 88
La Cour des comptes en bref 98

LISTE DES TABLEAUX

Tableau 1 : Budget du programme des 100 millions détaillé par domaine (situation 30.06.2017) 10

Tableau 2 : Potentiel disponible valorisable de la ressource biomasse 25

Tableau 3 : Récapitulatif des différentes technologies sur le marché pour la valorisation énergétique du bois 25

Tableau 4 : Principaux rapports reçus par la DIREN pour le projet EPFL – Leclanché 39

Tableau 5 : Rapports de visites et appréciations par les experts pour le projet EPFL – Leclanché 41

Tableau 6 : Dépenses réelles comparées au budget pour le projet EPFL – Leclanché 42

Tableau 7 : Principaux rapports reçus par la DIREN pour le projet HEIG-VD – Torplant 60

Tableau 8 : Rapports de visites et appréciations par les experts pour le projet HEIG-VD – Torplant 61

Tableau 9 : Dépenses réelles comparées au budget pour le projet HEIG-VD – Torplant 62

Tableau 10 : Résumé des résultats principaux pour les six premiers essais de torréfaction 67

LISTE DES FIGURES

Figure 1 : Organisation / structure générale du programme 12

Figure 2 : Budget des subventions du Canton de Vaud pour les projets de recherche (CHF) 14

Figure 3 : Organisation du contrôle et du suivi des projets de recherche du domaine C 15

Figure 4 : Composition de l'offre d'électricité (uniquement production nationale) jusqu'en 2020, 2035, 2050 sur la base du premier paquet de mesures de la Stratégie énergétique 2050 ... 17

Figure 5 : Production nette d'électricité en Suisse en 2015 18

Figure 6 : Evolution de la production d'électricité tirée de sources d'énergie renouvelables depuis 1990 pour différentes technologies 18

Figure 7 : Schéma de fonctionnement de l'installation Leclanché 19

Figure 8 : Capacités de stockage et puissance des différentes technologies 20

Figure 9 : Principales filières énergie-matière des différentes biomasses 22

Figure 10 : Surface forestière et production de bois par canton, Suisse, 2013 24

Figure 11 : Schéma de fonctionnement de l'installation Torplant 27

Figure 12 : Cadre contractuel du projet EPFL – Leclanché..... 36

Figure 13 : Principales étapes du projet EPFL – Leclanché 43

Figure 14 : Charges horaire et mensuelle des centrales électriques suisses en 2015..... 47

Figure 15 : Répartition des dépenses du projet EPFL – Leclanché 51

Figure 16 : Sources de financement du projet EPFL – Leclanché 52

Figure 17 : Cadre contractuel du projet HEIG-VD – Torplant 55

Figure 18 : Principales étapes du projet HEIG-VD – Torplant 63

Figure 19 : Comparaison des prix de combustible 2006 – 2016..... 70

Figure 20 : Empreinte environnementale, impacts générés et évités des technologies étudiées sur la santé humaine..... 74

Figure 21 : Répartition des dépenses du projet HEIG-VD – Torplant 75

Figure 22 : Sources de financement du projet HEIG-VD – Torplant 75

Figure 23 : Système énergétique et système technologique..... 95

Figure 24 : Dimensions d'analyse dans les chaînes de valeur 96

LISTE DES PRINCIPALES ABRÉVIATIONS UTILISÉES

ACV	Analyse du cycle de vie
CCF	Couplage chaleur force
DGE	Direction générale de l'environnement
DGE-ARC	Division air, climat et risques technologiques : l'une des trois divisions de la DGE-DIREV (Direction de l'environnement industriel, urbain et rural)
DGES	Direction générale de l'enseignement supérieur
DIREN	Direction cantonale de l'énergie
EPFL	Ecole polytechnique fédérale de Lausanne
GW	Gigawatt = un million de kilowatts
GWh	Gigawattheure = un million de kilowattheures
GRD	Gestionnaire de réseau de distribution électrique
GRT SA	Granit Technologies and Engineering (GRT) SA
GTER	Groupe de travail « Energies renouvelables »
HEIG-VD	Haute Ecole d'Ingénierie et de Gestion du Canton de Vaud
kW	Kilowatt
kWh	Kilowattheure
MT	Moyenne tension
OPAir	Ordonnance sur la protection de l'air du 16 décembre 1985
PCE	Proposition au Conseil d'Etat
SPECo	Service de la promotion économique et du commerce
TecOrbe	Technopôle de l'environnement situé à Orbe
UNIL	Université de Lausanne

GLOSSAIRE

Analyse du cycle de vie

L'analyse du cycle de vie (ACV), également appelé écobilan, est un moyen systémique d'évaluation des impacts environnementaux globaux d'un produit, d'un service, d'une entreprise ou d'un procédé.

Son but, en suivant la logique de « cycle de vie », est de connaître et pouvoir comparer la pression d'un produit sur les ressources et l'environnement tout au long de son cycle de vie, de l'extraction des matières premières jusqu'à son traitement en fin de vie (mise en décharge, recyclage...) en passant par les ressources naturelles utilisées.

(*https://fr.wikipedia.org/wiki/Analyse_du_cycle_de_vie*)

Batterie Lithium-ion titanate

Batterie qui utilise du titanate au lieu du traditionnel graphite, disposant d'une très longue durée de vie, avec environ 15'000 cycles de charge-décharge, contre 3'000 habituellement.

(*https://actu.epfl.ch/news/leclanche-et-l-epfl-innovent-pour-stocker-l-ener-8/*)

Biomasse

La biomasse peut être toute matière organique d'origine végétale, animale, bactérienne ou fongique. Dans le domaine de l'énergie, et plus particulièrement des bioénergies, la biomasse énergie est la partie de la biomasse utilisée ou utilisable comme source d'énergie ; soit directement par combustion (ex : bois énergie), soit indirectement après méthanisation (biogaz) ou d'autres transformations chimiques (biocarburants, aussi appelés « agrocarburants »).

(*https://fr.wikipedia.org/wiki/Biomasse_(énergie)*)

Dispatch plan

Le *dispatch plan* du *feeder* est le profil de consommation moyenne par tranches de 5 minutes que le *feeder* suit durant les opérations en temps réel. Il consiste en :

- la prévision de la consommation ;
- la demande de charge/décharge de la batterie nécessaire pour porter la batterie à un état de charge de 50%, qui est la meilleure valeur permettant de compenser une prévision non biaisée.

(*traduction de la présentation du 16.02.2016 de l'EPFL*)

Ecrêtage

Fait de couper les pointes de consommation électrique ; une pointe de consommation électrique est la consommation la plus élevée d'un réseau électrique pendant une période définie (jour, mois, saison, etc.).

Energie renouvelable

On désigne par énergie renouvelable une source d'énergie dont l'exploitation n'entraîne en aucune façon l'épuisement de la ressource initiale. Son renouvellement naturel est suffisamment rapide (ou son exploitation suffisamment modérée) pour qu'elle puisse être considérée comme inépuisable à l'échelle de temps humaine, comme le vent, le soleil ou la biomasse.

Les énergies renouvelables diffèrent fondamentalement des sources d'énergies non renouvelables qui ont nécessité des centaines de millions, voire des milliards d'années pour se constituer et dont les stocks actuels diminuent inexorablement au fur et à mesure qu'on les consomme. C'est le cas des agents fossiles (pétrole, charbon, gaz naturel) et du combustible nucléaire

(uranium).

(*http://www.energyscope.ch/a-propos/lexique/e*)

Feeder En électricité, le *feeder* est un moyen de maintenir une continuité du courant. Il peut être utilisé pour maintenir la puissance mais aussi pour assurer une liaison d'équilibrage entre plusieurs circuits. Le *feeder* prend la forme d'une ligne de distribution de courant électrique.

(*https://fr.wikipedia.org/wiki/Feeder_(électrique)*)

Gazéification La gazéification est un processus à la frontière entre la pyrolyse et la combustion. Celui-ci permet de convertir des matières carbonées ou organiques en un gaz de synthèse combustible (souvent appelé « syngas » ou « syngaz »), composé majoritairement de monoxyde de carbone (CO) et de dihydrogène (H_2), contrairement à la combustion dont les produits majoritaires sont le dioxyde de carbone (CO_2) et l'eau (H_2O).

(*https://fr.wikipedia.org/wiki/Gazéification*)

Gestionnaires de réseau de distribution Le groupe des gestionnaires de réseaux de distribution (GRD) comprend tous les acteurs du marché qui assurent le fonctionnement d'un réseau électrique en Suisse. En règle générale, ce sont des entreprises d'approvisionnement en électricité (EAE) qui garantissent une exploitation sûre et fiable du réseau de distribution et assurent ainsi le bon approvisionnement des clients finaux. La Suisse compte actuellement 800 gestionnaires de réseau de distribution.

(https://www.swissgrid.ch/swissgrid/fr/home/experts/dso.html)

Innovaud Association à but non lucratif créée en février 2013 par le Département de l'économie et du sport (DECS) de l'Etat de Vaud (devenu le DEIS, Département de l'économie, de l'innovation et du sport), le Département de la formation, de la jeunesse et de la culture (DFJC) de l'Etat de Vaud, les 6 technopôles actifs sur le canton de Vaud, la Fondation pour l'innovation technologique (FIT) et l'Association vaudoise pour la promotion des innovations et technologies (AIT).

Innovaud aiguille les entreprises porteuses de projets d'innovation vers les différentes possibilités de soutien qui s'offrent à elles. Toute start-up, PME ou multinationale établie dans le canton de Vaud ou désirant s'y établir peut faire appel à Innovaud pour mener à bien son projet d'innovation, peu importe que celui-ci soit déjà mis en œuvre ou non. Seuls critères : il doit être innovant et axé sur la technologie.

(*http://www.innovaud.ch/*)

Méthanation La méthanation est un procédé industriel de conversion catalytique du dihydrogène (H_2) et du monoxyde de carbone (CO) ou du dioxyde de carbone (CO_2) en méthane. Elle est notamment utilisée dans la production d'un gaz naturel de synthèse à partir de gaz de bois.

(*https://fr.wikipedia.org/wiki/Méthanation*)

Méthanisation La méthanisation (ou digestion anaérobie) est le processus naturel biologique de dégradation de la matière organique en absence d'oxygène (anaérobie). Il se produit naturellement dans certains sédiments, les marais, les rizières, ainsi que dans le tractus digestif de certains animaux. Une partie de la matière organique est dégradée en méthane, et une autre est utilisé par les micro-organismes méthanogènes pour leur croissance et reproduction. La décomposition n'est pas complète et laisse le « digestat » (en partie

comparable à un compost).

La méthanisation est aussi une technique mise en œuvre dans des méthaniseurs où l'on accélère et entretient le processus pour produire un méthane utilisable (biogaz, dénommé biométhane après épuration). Des déchets organiques (ou produits issus de cultures énergétiques, solides ou liquides) peuvent ainsi fournir de l'énergie.

(*https://fr.wikipedia.org/wiki/Méthanisation*)

Nouvelles énergies renouvelables

L'expression « nouvelles énergies renouvelables » (ner) recouvre toutes les sources d'énergie renouvelables non traditionnelles : soit celles nouvellement exploitées, soit celles déjà existantes, mais valorisées d'une nouvelle manière. La transition énergétique actuelle se caractérisera notamment par une utilisation à large échelle des « ner ». (…)

Le bois et l'hydraulique représentent les énergies renouvelables dites « traditionnelles ». Toutes les autres sources d'énergie renouvelables sont considérées comme « nouvelles », car elles n'étaient pas, ou très peu, exploitées jusqu'à aujourd'hui. A noter que la petite hydraulique, qui comprend tous les ouvrages hydroélectriques d'une puissance inférieure à 10 MW, est également considérée comme nouvelle énergie renouvelable, bien qu'elle soit déjà largement exploitée. Il en va de même pour toutes les formes de biomasse autres que le bois (résidus agricoles, plantes cultivées à des fins énergétiques, déchets verts, boues d'épurations, etc.), ainsi que pour les technologies avancées de valorisation du bois (pellets, biocarburant de 2e génération à partir de résidus du bois, etc.). La notion de « nouvelles énergies renouvelables » est donc purement une question de vocabulaire. Elle a été introduite essentiellement pour faciliter la distinction, au cours des débats politiques, entre les sources d'énergie renouvelables traditionnelles (économiquement viables sans subsides), et les nouvelles, qui nécessitent des subventions pour prendre leur essor.

(*http://www.energyscope.ch/100-questions/energies-renouvelables/qu-entend-on-par-nouvelles-energies-renouvelables-ner, consulté le 07.11.2017*)

Prosumption

Production/consommation électrique (Source : rapport final EPFL)

Pyrolyse

La pyrolyse est la décomposition chimique d'un composé organique par une augmentation importante de sa température pour obtenir d'autres produits (gaz et matière) qu'il ne contenait pas. L'opération est réalisée en l'absence d'oxygène ou en atmosphère pauvre en oxygène pour éviter l'oxydation et la combustion (l'opération ne produit donc pas de flamme). Il s'agit du premier stade de transformation thermique après la déshydratation.

Elle permet généralement d'obtenir un solide carboné, une huile et un gaz. Elle débute à un niveau de température relativement bas (à partir de 200 °C) et se poursuit jusqu'à 1'000 °C environ. Selon la température, la proportion des trois composés résultants est différente.

(*https://fr.wikipedia.org/wiki/Pyrolyse*)

Services système

Dans le cadre de l'approvisionnement en électricité, on entend par services système les services d'assistance qui sont fournis au client par les gestionnaires de réseau, en plus du transport et de la distribution d'énergie électrique. En Suisse, afin que l'exploitation du système puisse être garantie de manière fiable, Swissgrid organise dans le cadre de ses obligations légales la mise à disposition des services système suivants :

- l'énergie de réglage (réglage primaire, secondaire et tertiaire) ;
- le maintien de la tension ;
- la compensation des pertes de transport ;
- l'aptitude au démarrage autonome et à la marche en îlotage ;
- la coordination du système ;
- la mesure d'exploitation.

(*https://www.swissgrid.ch/swissgrid/fr/home/experts/topics/ancillary_services.html*)

Soutirage Le soutirage électrique correspond à la quantité d'énergie produite distribuée depuis le réseau électrique.

(*https://www.swissgrid.ch/swissgrid/fr/home/reliability/grid_stability.html*).

Torgaz Gaz pauvre libéré durant la torréfaction de biomasse.

Torréfaction de biomasse ligneuse Prétraitement thermique qui diminue la teneur en oxygène de la biomasse traitée, augmente son homogénéité et son pouvoir calorifique, rendant possible une utilisation en tant que combustible solide de haute valeur ajoutée. Une biomasse brute de basse qualité est transformée en combustible possédant des propriétés bien adaptées au stockage (elle devient hydrophobe), à la combustion ou à la gazéification, et également à la densification (elle devient très friable) et au transport sous forme de pellets.

(adapté de la plaquette HEIG-VD – GRT SA)

D'un point de vue énergétique, l'énergie contenue dans la biomasse est quasiment totalement préservée : par exemple, pour le bois, 95% de l'énergie initiale est conservée lorsque la torréfaction se déroule à 240°C, température qui correspond à la température de torréfaction de ce matériau.

(*https://fr.wikipedia.org/wiki/Torréfaction_de_la_biomasse*)

1. LE DOMAINE AUDITÉ

1.1. LE PROGRAMME DES 100 MILLIONS

HISTORIQUE

Le 19 août 2011, le Conseil d'Etat a décidé d'une affectation spécifique, à hauteur de CHF 500 millions, de l'excédent financier initialement prévu pour la péréquation fédérale (RPT), en vue de financer des projets porteurs pour l'avenir du canton dans un contexte économique fragilisé.

Afin de soutenir les actions favorisant les énergies renouvelables et les économies d'énergie, et en cohérence avec son futur programme de législature 2012-2017[1], il a affecté CHF 100 millions à un programme qu'il a nommé « 100 millions pour les énergies renouvelables et l'efficacité énergétique » (ci-après : programme des 100 mios). Ce programme a été lancé en janvier 2012.

CONTENU DU PROGRAMME

Le programme des 100 mios est un budget exceptionnel attribué à un programme sur une durée limitée, qui vient s'additionner au budget ordinaire de la Direction cantonale de l'énergie (DIREN)[2]. Il soutient des actions de natures très diverses réparties en quatre domaines (A – D), ainsi qu'une enveloppe pour les frais de gestion du programme et une réserve (E).

Au terme du premier semestre 2016, le champ d'action ainsi que les enveloppes ont été mis à jour afin de tenir compte de l'évolution des projets, des technologies, ainsi que du contexte économique et politique (cf. interpellation Cédric Pillonel, dont la réponse et les propositions de mesures ont été adoptées par le Grand Conseil le 24.11.2015).

Tableau 1 : Budget du programme des 100 millions détaillé par domaine (situation 30.06.2017)

(CHF mios)	Enveloppes initiales	Mise à jour juillet 2016	Octroyé[3] au 30 juin 2017	Payé au 30 juin 2017
A. Efficacité énergétique : • A.1 Assainissement des bâtiments • A.2 Audit des grands consommateurs	35.00	30.00	27.54	14.17
B. Nouvelles énergies renouvelables : • B.1 RPC de l'électricité photovoltaïque • B.2 Développement du bois énergie • B.3 RPC de l'électricité issue de la biomasse humide • B.4 Soutien au biogaz issu de la biomasse humide • B.5 Soutien à divers projets hydrauliques	36.10	37.29	27.39	17.60

[1] Mesure n° 4.4 « Développer les énergies renouvelables, garantir la sécurité de l'approvisionnement, favoriser les économies d'énergie »
[2] Le budget 2012 du Service de l'environnement et de l'énergie (devenu la DIREN) s'élevait à CHF 31 mios.
[3] Montants qui ont fait l'objet d'une décision administrative formelle envoyée à des bénéficiaires

(CHF mios)	Enveloppes initiales	Mise à jour juillet 2016	Octroyé[3] au 30 juin 2017	Payé au 30 juin 2017
C. Recherche et développement : • C.1 Appui à des projets des Hautes Ecoles	12.28	13.28	12.53	10.25
D. Formation et information : • D.1 Soutien à la formation dans le domaine de l'énergie • D.2 Opération information et incitation	3.62	3.12	2.82	1.56
E. Gestion et réserve :				
• E.1 Ressources de gestion	3.00	6.31	5.10	3.77
• E.2 Réserve	10.00	10.00	0.00	0.00
Total	**100.00**	**100.00**	**75.38**	**47.35**

Sources : *Propositions au Conseil d'Etat des 21.12.2011 et 24.06.2016 et informations de la DIREN*

DOUBLE OBJECTIF DU PROGRAMME

Le Conseil d'Etat a défini un double objectif pour le programme des 100 mios :

1. Amorcer la transition énergétique rendue impérative par l'évolution du secteur,
2. Apporter un soutien à l'environnement économique vaudois.

Il a également indiqué que ce programme s'ancre dans une vision prospective en soutenant des équipes de recherche de l'EPFL, de la HEIG-VD ou de l'UNIL, subventionnées dans le cadre du domaine C, objet du présent audit.

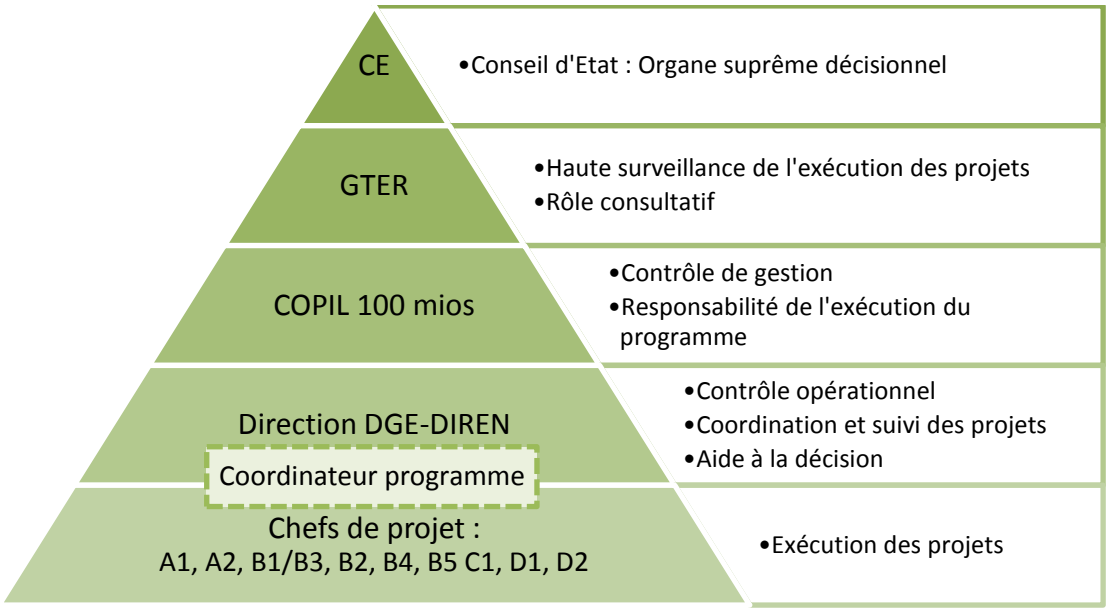
GOUVERNANCE DU PROGRAMME

Le Conseil d'Etat a constitué un groupe de travail « Energies renouvelables » (GTER), chargé de la haute surveillance de l'exécution des projets et des décisions majeures concernant le programme. Le GTER, présidé par le directeur de la Direction générale de l'environnement (DGE) avec l'aide de la Direction de l'énergie (DIREN), est composé :

- du secrétaire général du Département du territoire et de l'environnement (DTE),
- du chef du Service du développement territorial (SDT),
- du chef du Service d'analyse et de gestion financière (SAGEFI)
- et de la cheffe de la Direction générale de l'enseignement supérieur (DGES).

La direction du programme a été confiée à la DIREN, avec un COPIL 100 mios (composé du Directeur de l'Energie, du Directeur adjoint et du Chef du support administratif de la DGE), un coordinateur du programme et des chefs de projets pour les différents sous-domaines (cf. Figure 1).

Figure 1 : Organisation / structure générale du programme



Source : *Cour des Comptes sur base des informations de la DGE-DIREN*

1.2. LES PROJETS DE RECHERCHE – DOMAINE C

OBJECTIFS GLOBAUX POUR LE DOMAINE C

Les deux objectifs définis par le Conseil d'Etat pour l'ensemble du programme mentionnés ci-dessus ont été précisés pour le domaine C, il en découle deux objectifs globaux suivants :

Objectif 1 : Développement des nouvelles énergies renouvelables

Le domaine C doit permettre d'amorcer la transition énergétique en développant les nouvelles énergies renouvelables (cf. glossaire).

Des objectifs quantitatifs (p.ex. potentiel total d'économie ou de production d'énergie espérés en cas de succès des projets de recherche) n'ont pas été fixés pour le domaine C globalement. En effet, ces projets se trouvant à un stade de développement préliminaire, la DIREN n'était pas en mesure de savoir si des entreprises seraient intéressées par ces prototypes en vue d'un développement commercial.

La production ou le stockage d'énergie attendu en cas de succès des projets n'étant pas évalués, les coûts (en CHF/kWh pour l'énergie produite ou économisée) ne pouvaient pas être estimés non plus pour le domaine C.

Objectif 2 : Soutien à l'économie locale

Le facteur multiplicateur espéré n'a pas été estimé pour les projets de recherche du domaine C. A ce sujet, les Propositions présentées au Conseil d'Etat (PCE)[4] pour ces projets contiennent une mise en garde : « De par la nature même de la recherche, même appliquée, une garantie absolue

[4] PCE 07.05.2013 pour les projets HEIG-VD et UNIL et 15.05.2014 pour le projet EPFL-Leclanché

ne peut être fournie quant aux résultats finaux et donc aux retombées économiques ou aux effets multiplicateurs.(…) Si les retombées économiques ne peuvent donc être décrites précisément par des chiffres, on peut toutefois attendre des conséquences intéressantes en termes d'emplois et de mise sur le marché. »

Par contre, sur la base des descriptifs de projets préparés par les Hautes Ecoles, la DIREN a mis en évidence les retombées économiques espérées des différents projets, en termes de création d'entreprises et création d'emplois, ainsi que le marché auquel les technologies développées s'adressaient et les autres retombées positives espérées en cas de succès.

SÉLECTION DES PROJETS

Afin de maximiser les retombées économiques et l'effet multiplicateur du domaine C, le Conseil d'Etat a décidé de financer des projets de recherche et de développement répondant aux critères suivants :

- projets menés par des **Hautes Ecoles vaudoises** ou réalisés en étroite collaboration avec elles,
- en **stade de développement avancé** ou en phase de production de prototypes,
- pouvant **générer des affaires** dans les entreprises, start-ups ou spin-offs **vaudoises**.

Le Conseil d'Etat a voulu mettre l'accent notamment sur des projets novateurs de stockage de l'énergie électrique. De plus, il souhaitait voir ces projets aboutir dans un délai de deux à quatre ans et les projets soutenus ne devaient en aucune façon avoir d'effets pérennes sur le budget de l'Etat.

Ces contraintes ont été fixées de manière à bien cadrer ce programme et ont limité le choix des projets possibles. La sélection des projets subventionnés s'est faite sur la base d'un nombre restreint de propositions : sur dix projets présentés initialement par les Hautes Ecoles au GTER pour obtenir un subventionnement, neuf ont finalement été retenus.

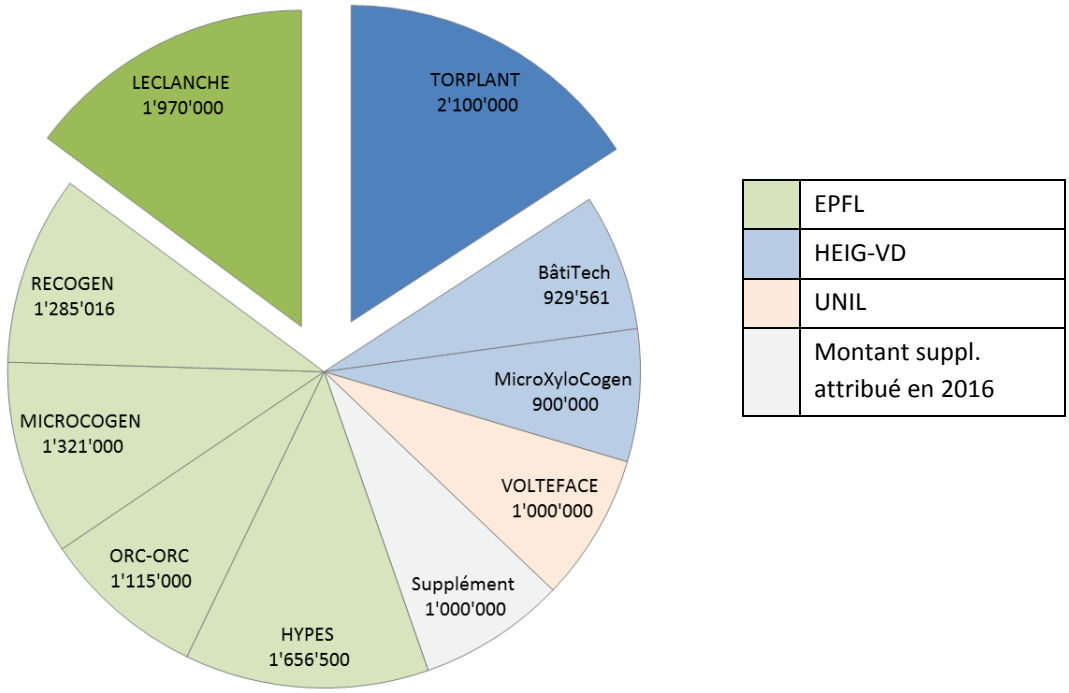
La DIREN a mandaté un spécialiste reconnu de l'ingénierie énergétique scientifique pour effectuer une analyse détaillée des projets. Celle-ci a été présentée à un groupe de projet ad hoc, constitué principalement de représentants du domaine académique[5]. Les projets ont ensuite été validés par le GTER avant que les PCE soient présentées au Conseil d'Etat pour approbation.

BUDGET AFFECTÉ AUX PROJETS DU DOMAINE C

Cinq projets menés par l'EPFL, trois par la HEIG-VD et un par l'UNIL sont financés dans le cadre de ce programme (voir détails en annexe I).

[5] La composition de ce groupe de projet, arrêtée par le GTER, était la suivante : un représentant d'Innovaud mandaté par le SPECO, un représentant de l'UNIL, un représentant de la HEIG-VD, un représentant de l'EPFL, des représentants du Service de l'Energie (SEVEN, qui est devenu par la suite DIREN et a été intégré à la nouvelle DGE), l'ingénieur conseil mandaté par le Canton. Les compétences de ce groupe étaient : préaviser les projets en termes de finance et de contenu, suivre les projets et valider les étapes sur les quatre ans.

Figure 2 : Budget des subventions du Canton de Vaud pour les projets de recherche (CHF)



Source : *Cour des Comptes sur base des descriptifs de projets et de la PCE du 24.06.2016*

Initialement doté d'un budget de CHF 12.28 mios répartis entre neuf projets (cf. Tableau 1 ci-dessus), le domaine C a reçu en juillet 2016 un montant supplémentaire de CHF 1 mio, destiné aux entreprises partenaires de projets qui auraient été pénalisées par le « franc fort », ce qui a porté le total à CHF 13.28 mios (cf. Figure 2 ci-dessus).

Le présent audit porte sur les deux projets du domaine C ayant reçu les subventions les plus élevées, soit respectivement 1.97 mios pour l'EPFL (projet Leclanché) et 2.1 mios pour la HEIG-VD (projet Torplant).

CADRE LÉGAL ET CONTRACTUEL

Les bases légales permettant le financement des différents projets sont la Loi sur les subventions (LSubv), la Loi sur l'énergie (LVLEne) et le Règlement du Fonds pour l'énergie (RF-Ene).

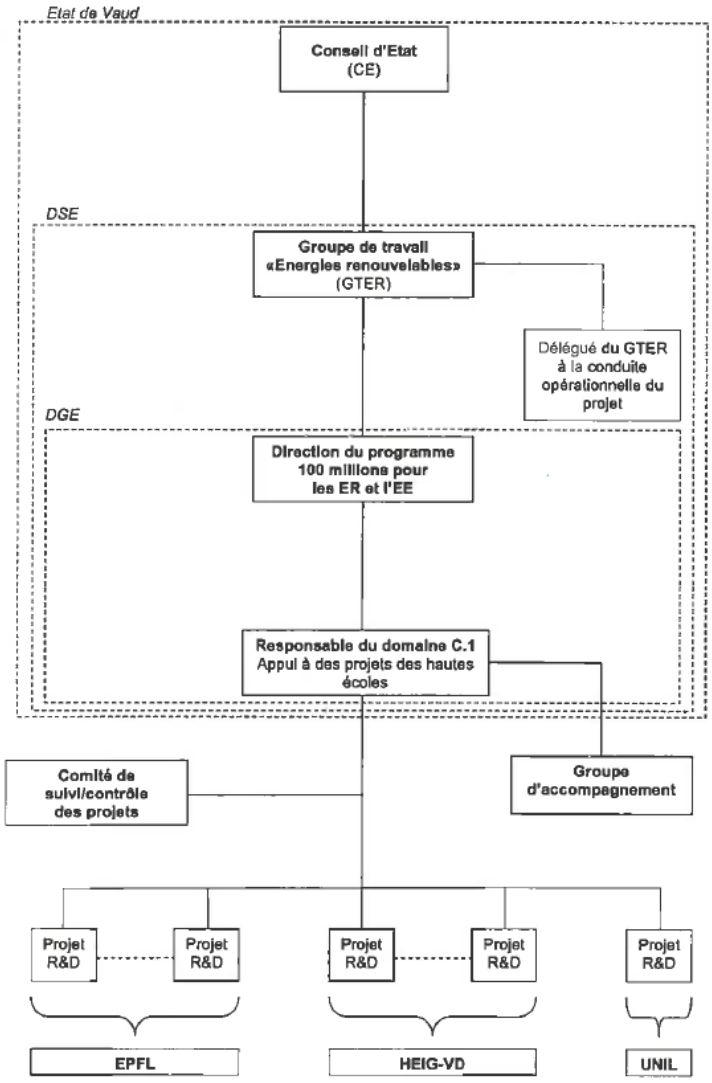
La DIREN a dû effectuer un travail d'analyse juridique et financière relativement important avant de pouvoir déployer concrètement les projets : d'une part, le soutien à des projets des Hautes Ecoles était un domaine habituellement réservé à la Confédération et pour lequel l'Administration cantonale n'avait pas d'expérience et, d'autre part, chacune des Hautes Ecoles bénéficiait d'un statut juridique différent.

Tel que prévu par la LSubv, les subventions ont été octroyées par des conventions auxquelles ont été annexés des descriptifs de projet préparés par les Hautes Ecoles selon un modèle fourni par la DIREN. La HEIG-VD étant à l'époque financièrement intégrée dans les comptes de l'Etat de Vaud, le financement de ses projets s'est réalisé par le biais d'un crédit supplémentaire entièrement compensé (pour plus d'informations, voir le chapitre 4.1.1).

GOUVERNANCE DU DOMAINE C

Le programme des 100 mios dans son ensemble est doté d'une structure et d'une organisation spécifique (cf. chapitre 1.1, paragraphe « Gouvernance du programme »). Au sein de celle-ci, l'opération « Appui à des projets des Hautes Ecoles » est conduite par un *Responsable du domaine C* qui bénéficie notamment de l'appui d'un *Groupe d'accompagnement*, constitué de représentants des Hautes Ecoles et d'un membre du SPECo (cf. Figure 3 ci-dessous).

Figure 3 : Organisation du contrôle et du suivi des projets de recherche du domaine C



Source : *Directive d'organisation, Domaine C.1 – Appui à des projets des Hautes Ecoles, Compétences et procédures, Janvier 2013 (note : DSE est devenu DTE, Département du territoire et de l'environnement)*

Un *Comité de suivi/contrôle des projets* a été constitué afin d'assister le *Responsable du domaine C*. Il comprend un spécialiste dans la recherche énergétique, mandaté pour suivre de près les projets et se prononcer sur les rapports (identifier d'éventuels choix sans issue, évaluer scientifiquement les résultats, conseiller des orientations, etc.), ainsi que deux conseillers de Innovaud (cf. glossaire), l'adjoint du chef de projet du domaine C.1 et le responsable des finances de la DGE.

Afin de cadrer le suivi des projets de recherche subventionnés, la DGE a établi en janvier 2013 une « Directive d'organisation – Domaine C.1 – Appui à des projets des Hautes Ecoles – Compétences et procédures », qui décrit les rôles et compétences des entités extérieures (Hautes Ecoles, groupe d'accompagnement et comité de suivi / contrôle de projet) ainsi que des entités du Département (chef de projet de la DIREN responsable du domaine C, Direction du programme 100 mios, GTER et administrateur délégué). Les procédures financières appliquées dans le cadre du programme des 100 mios sont également détaillées dans cette directive.

La gestion de cette opération a nécessité l'octroi de mandats extérieurs afin d'assister le chef de projet DGE dans son rôle de contrôle et de suivi. Les frais de gestion sont inclus dans le volet E du programme des 100 mios qui ne fait pas partie du périmètre de cet audit (cf. chapitre 2.1). Au 30 juin 2017, un montant de kCHF 254 avait été octroyé pour ces frais (dont kCHF 204 payés).

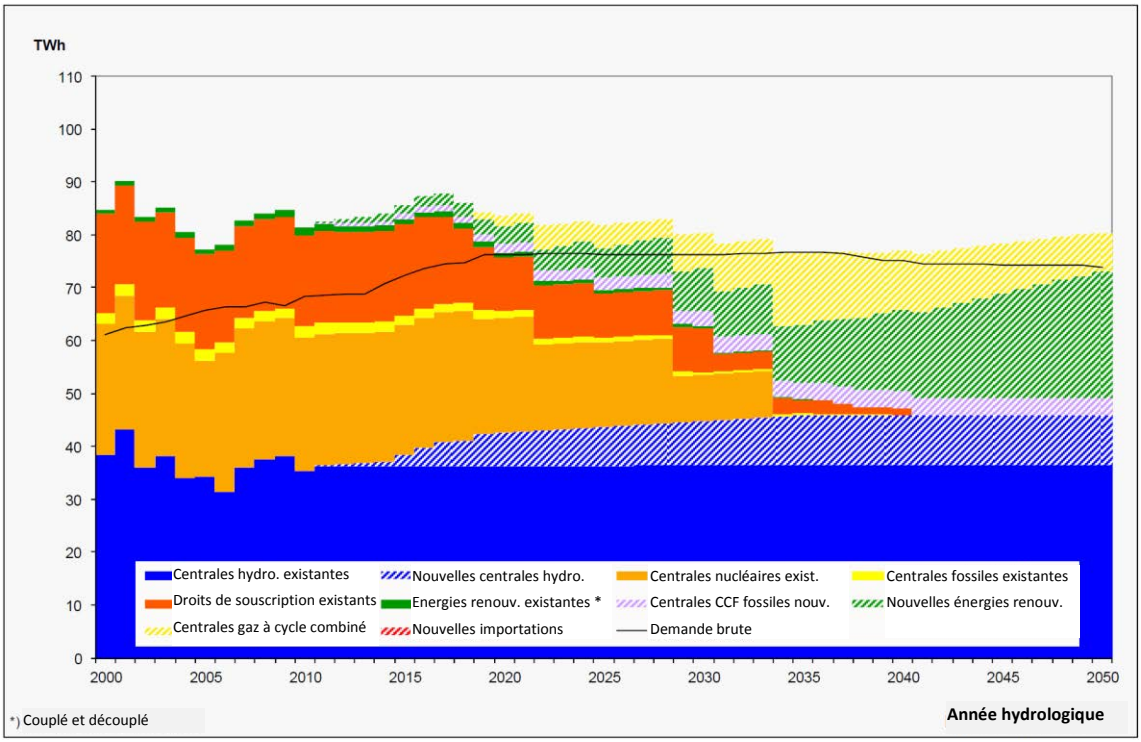
1.3. LE PROJET EPFL – LECLANCHÉ

CONTEXTE

Croissance des nouvelles énergies renouvelables

Depuis quelques années, la part des nouvelles énergies renouvelables dans l'électricité consommée en Suisse est en augmentation. Cette tendance devrait s'accélérer avec la mise en place de la Stratégie énergétique 2050. Le potentiel écologique représenté par la production d'électricité supplémentaire à partir de nouvelles énergies renouvelables d'ici 2050 est estimé à plus de 22'000 GWh au total par an[6] (sans la force hydraulique représentée en bleu dans la Figure 4). Les nouvelles énergies renouvelables sont représentées par la partie en vert hachuré dans la Figure 4 ci-dessous.

Figure 4 : Composition de l'offre d'électricité (uniquement production nationale) jusqu'en 2020, 2035, 2050 sur la base du premier paquet de mesures de la Stratégie énergétique 2050

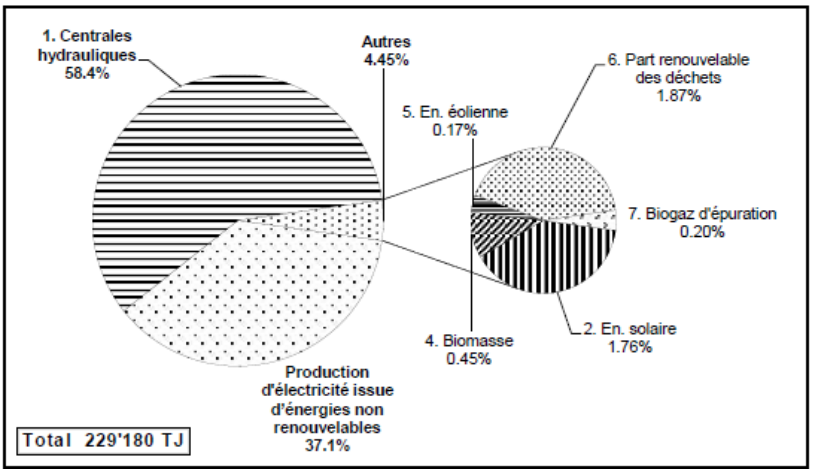


Source : *Prognos, dans la fiche « Questions et réponses concernant le paquet énergétique 2050 », Conseil Fédéral, 18.04.2012*

En 2015, la production nette d'électricité en Suisse s'est élevée à 63'661 GWh (soit 229'180 TJ sur la Figure 5). Quelque 40'021 GWh (62.9 % de la production indigène) sont imputables aux énergies renouvelables. Comme le montre la Figure 5 ci-dessous, la plus grande partie provient de l'énergie hydraulique, alors que les autres énergies renouvelables réunies – solaire, biomasse, biogaz, énergie éolienne, valorisation des déchets – ont fourni de l'électricité à hauteur de 2'830 GWh, soit 4.5 % de la production totale d'électricité.

[6] Source : Office fédéral de l'énergie : Fondements pour la Stratégie énergétique du Conseil fédéral ; printemps 2011, Actualisation des perspectives énergétiques 2035 (modèles d'économie énergétique), mai 2011, Berne

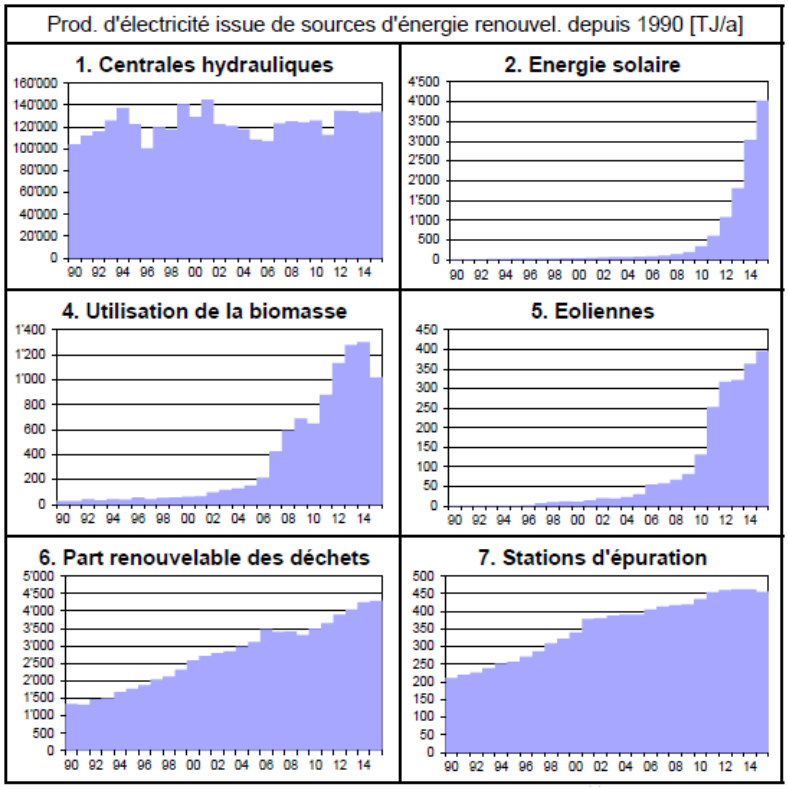
Figure 5 : Production nette d'électricité en Suisse en 2015



Source : *Schweizerische Statistik der erneuerbaren Energien Ausgabe 2015, OFEN, septembre 2016*

Comme le montre la Figure 6, sur les dix dernières années, on constate une nette augmentation de la quantité d'électricité produite par les nouvelles énergies renouvelables (voir données détaillées en annexe IV) :

Figure 6 : Evolution de la production d'électricité tirée de sources d'énergie renouvelables depuis 1990 pour différentes technologies



Source : *Schweizerische Statistik der erneuerbaren Energien Ausgabe 2015, OFEN, septembre 2016*

Enjeu du stockage de l'électricité

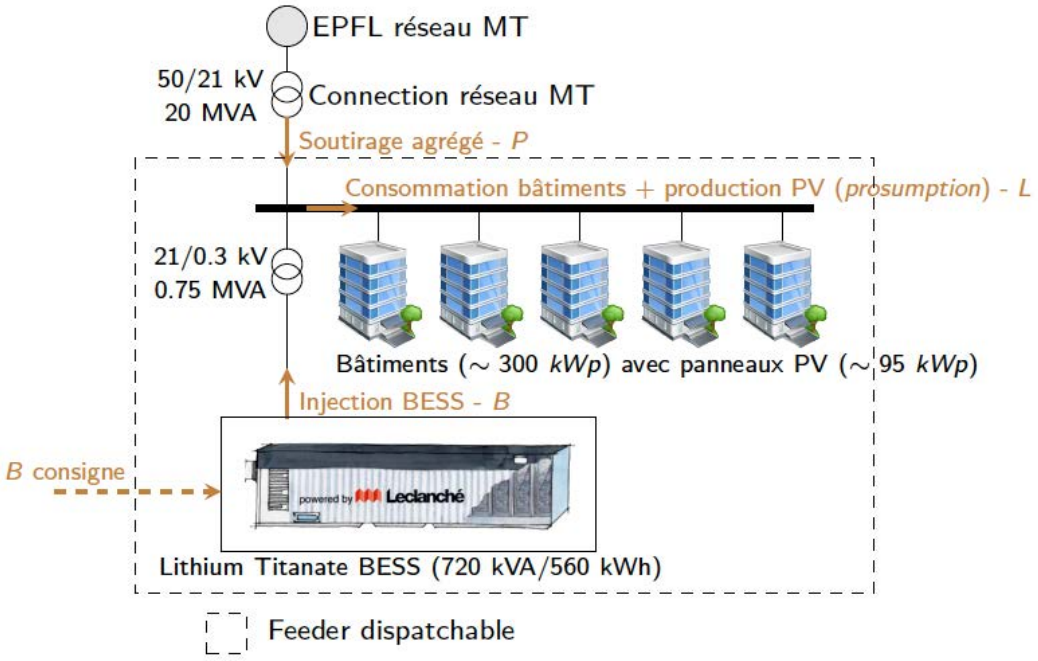
La production de courant photovoltaïque ou éolien dépend des conditions météorologiques. Elle ne peut donc pas être régulée, ni sur le plan temporel, ni sur le plan quantitatif. Si elle ne

coïncide pas avec la demande, il faut soit adapter la consommation d'électricité à la production, soit stocker l'énergie inutilisée, soit faire appel à d'autres sources de production. L'équilibre doit être assuré entre les saisons, d'un jour à l'autre, voire d'une heure à l'autre, dans la mesure où la part croissante de l'énergie irrégulière issue de sources renouvelables conduit à des déséquilibres à court terme entre production et consommation. Des solutions de stockage permettant de corréler l'offre à la demande doivent donc être développées et nécessitent des investissements dans la recherche et développement.

NATURE DU PROJET

Le projet EPFL – Leclanché consiste à développer une installation pilote (appelée ci-après « démonstrateur ») incluant un système de stockage électrique. Celui-ci devait avoir une taille suffisante pour compenser les flux de puissance résultant de la production décentralisée d'une partie du parc photovoltaïque de 15'000 m^2 de l'EPFL et circulant dans une ligne (« *feeder* »[7]) du réseau de moyenne tension (MT) de l'EPFL (cf. Figure 7 ci-dessous).

Figure 7 : Schéma de fonctionnement de l'installation Leclanché



Source : *Rapport final de l'EPFL pour le projet EPFL – Leclanché*

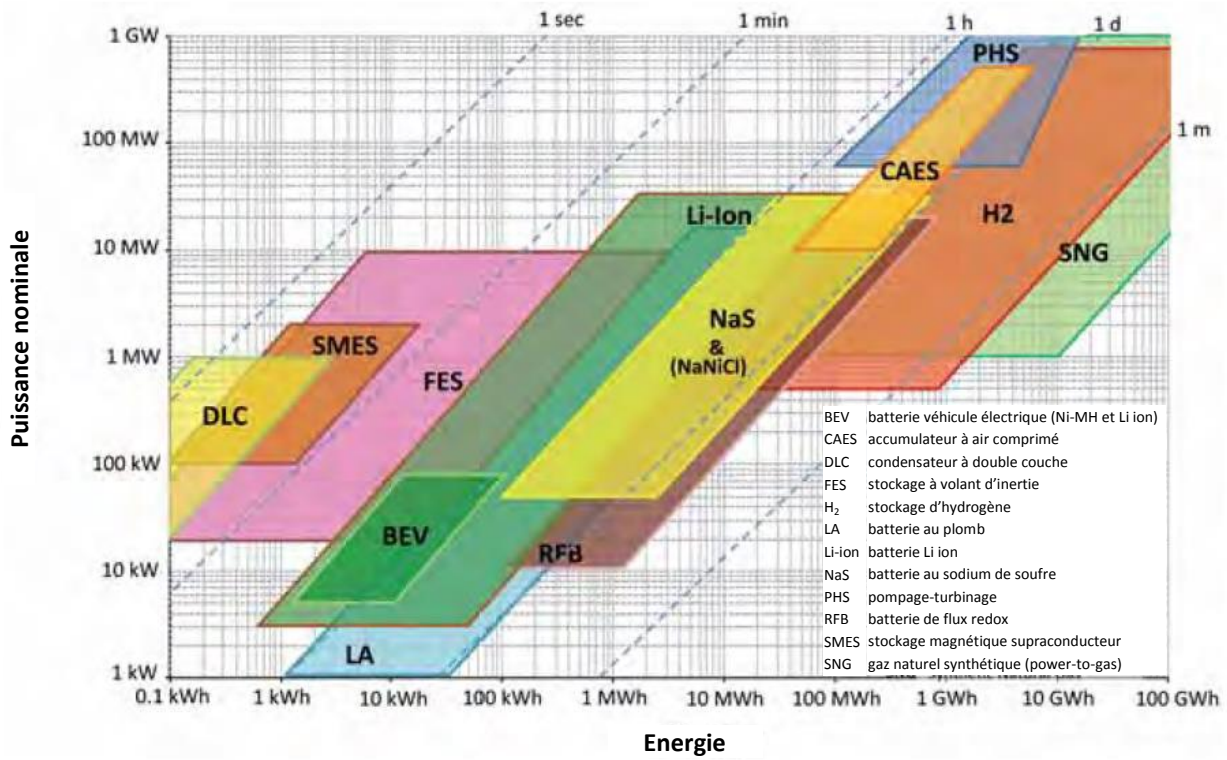
Le système de stockage a pris la forme d'un container d'une capacité de 500 kWh issu d'une technologie de batterie novatrice (lithium-ion titanate), correspondant à la consommation de 50 ménages par jour. Les logiciels d'exploitation ont été développés par l'EPFL. Il est possible d'estimer la quantité d'énergie pouvant être stockée pendant la durée de vie du container : avec deux cycles de charge par jour, pendant une durée de vie d'environ vingt ans, cela représente environ 15'000 cycles au total, soit une quantité d'énergie que l'on peut espérer stocker d'environ 7.5 GWh.

[7] Le but d'un *feeder* est de servir de plateforme opérationnelle pour l'exploitation optimale des ressources renouvelables (en particulier le photovoltaïque) et leur intégration dans les réseaux électriques de distribution en moyenne tension.

Comme le mentionne le responsable du projet à l'EPFL « Le stockage de l'énergie électrique à travers l'utilisation de batteries de grande capacité et longue durée de vie est un véritable défi qui conditionne l'intégration massive des énergies renouvelables destinées à la production d'électricité. Ce partenariat va nous permettre de valider les technologies utilisées pour stocker l'énergie solaire à une échelle industrielle. … »[8].

Les batteries lithium-ion utilisées dans le cadre de ce projet se positionnent parmi différentes technologies de stockage d'électricité, qui ont des puissances et capacités de stockage différentes selon la technologie et qui sont employées pour du stockage de courte ou longue durée (voir « Li-ion » dans la Figure 8 ci-dessous).

Figure 8 : Capacités de stockage et puissance des différentes technologies



Source : *Electrical Energy Storage – White Paper, IEC, Geneva, 2011*

Afin de pouvoir être développé, le système de stockage devait avoir un coût compétitif. Au démarrage du projet, le coût (ct/kWh) du lithium-ion titanate a été estimé et comparé avec d'autres technologies (batteries plomb acide et batteries lithium-ion classiques). Il en ressortait que ce produit était plus avantageux que d'autres technologies, notamment grâce à sa plus grande robustesse, ce qui autorise un plus grand nombre de cycles de charge, raison pour laquelle il a été choisi.

En résumé, le projet s'est déployé selon deux approches qui se complètent, il s'agit :

- du développement d'algorithmes permettant d'optimiser le système de stockage (sécurité et intégration maximum de ressources spontanément variables) et, à la fin du

[8] Communiqué conjoint Leclanché, EPFL, Romande Energie et Canton de Vaud, 29.08.2014

projet, lancement d'activités économiques valorisant ces algorithmes (lancement de start-ups pour commercialiser les logiciels développés) ;

- du développement d'un démonstrateur en grandeur réelle de l'opérationnalité du système de stockage et piloté par les algorithmes.

PARTENAIRES

Les rôles de l'EPFL et des deux partenaires avec lesquels elle a collaboré sont les suivants :

EPFL

Le Distributed Electrical Systems Laboratory et le Power Systems Research Group ont coordonné le projet, modélisé le système de stockage, fourni l'infrastructure de monitoring en temps réel du réseau de moyenne tension de l'EPFL, défini et déployé les algorithmes de réglage du système de stockage.

L'EPFL et Romande Energie ont construit ensemble, sur le campus de l'Ecole, le plus grand parc solaire de Suisse intégré à un complexe de bâtiments existants. Inauguré en 2015, ce parc, d'une surface de 15'500 m^2, couvre plus de 25 toitures, à l'image d'une seule centrale sur tous les toits d'un quartier. C'est également un important laboratoire de recherche et d'enseignement. Le parc produit 2,2 millions de kilowattheures par an, soit l'équivalent de la consommation annuelle de 610 ménages.[9]

Leclanché SA

Cette entreprise est basée à Yverdon-les Bains et a pour but la conception, le développement et l'assemblage de systèmes de stockage d'énergie électrique, ainsi que la distribution de piles et d'accessoires électriques.

Dans le cadre du projet, elle a fourni le système de stockage. Elle a produit les cellules lithium-ion titanate, en a assuré l'assemblage dans des modules et les a intégrées dans des armoires industrielles comprenant les éléments de gestion de la sécurité et de l'agrégation. L'ensemble a finalement être incorporé dans un container.

Romande Energie SA

La Romande Energie est le premier fournisseur d'électricité en Suisse romande. Ses métiers de base sont la production, la distribution et la commercialisation d'énergie ainsi que les services énergétiques. Dans ce projet, elle a tenu un double rôle : elle représente un « client type », exploitant d'un réseau de distribution électrique formulant les contraintes d'exploitation d'un gestionnaire de réseau de distribution (GRD) et est également un producteur mettant à disposition le Parc solaire situé sur le site de l'EPFL.

La contribution de Romande Energie au projet a consisté à financer, sur une durée de 4 ans, la réalisation d'un doctorat à l'EPFL en relation avec ce projet.

[9] Source : *http://developpement-durable.epfl.ch/parc-solaire*

1.4. LE PROJET HEIG-VD – TORPLANT

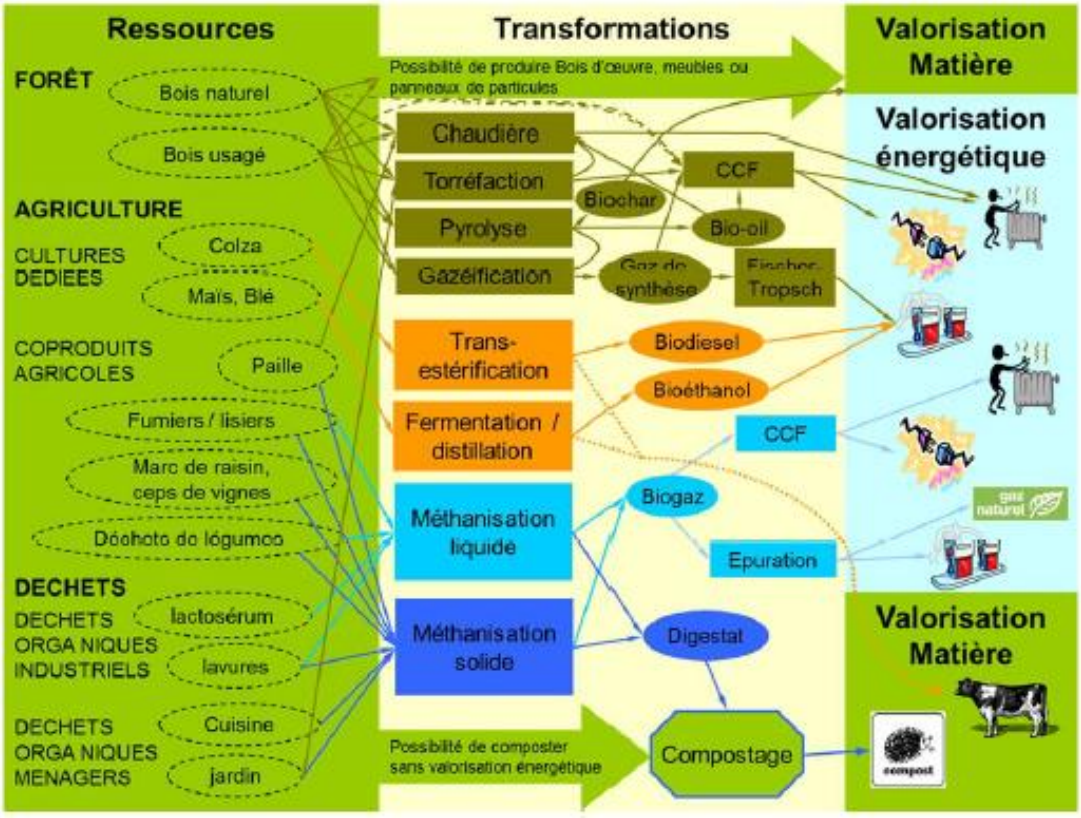
CONTEXTE

Filières énergie-matière des biomasses

Dans le domaine de l'énergie, et plus particulièrement des bioénergies, la biomasse énergie est la partie de la biomasse utilisée ou utilisable comme source d'énergie ; soit directement par combustion, soit indirectement après méthanisation ou d'autres transformations chimiques. La biomasse peut être toute matière organique d'origine végétale, animale, bactérienne ou fongique (cf. Ressources dans la Figure 9 ci-dessous).[10]

Les ressources biomasse sont multiples et font partie de filières souvent complexes. Ces dernières peuvent utiliser des ressources locales appartenant au périmètre du canton mais également des ressources non locales (essentiellement dans le cas du bois). Elles peuvent être analysées selon une approche Ressources, Transformations, Valorisation, illustrée par la Figure 9 ci-dessous (filières non exhaustives). L'interconnexion entre les filières matière et énergie montre l'importance d'une vision globale (approche « filières »).

Figure 9 : Principales filières énergie-matière des différentes biomasses



Source : *adapté de Faessler, thèse VIRAGE, 2011, https://archive-ouverte.unige.ch/unige:17272*

La valorisation énergétique de la biomasse peut prendre plusieurs formes, en termes de produits et coproduits :

[10] Source : Wikipedia

- Energie thermique : la valorisation de la chaleur doit se faire localement (la chaleur étant difficile à transporter), ce qui implique d'être proche des utilisateurs ou d'une infrastructure de chauffage à distance ;
- Energie électrique : la valorisation de l'électricité se fait par injection dans le réseau électrique (disponible sur tout le territoire) sans grandes contraintes ;
- Énergie chimique : la valorisation du gaz produit par méthanation (cf. glossaire) ou par méthanisation (cf. glossaire) nécessite que le réseau de gaz naturel passe à proximité pour permettre l'injection ; la valorisation des produits liquides ou solides (bio-oil, **plaquettes ou pellets torréfiés**) se fait via le réseau routier ;
- Amendement agricole : qui constitue une valorisation très importante pour les autres filières biomasse (bio méthanisation et compostage) puisque, si la biomasse est issue du cycle du carbone, d'autres éléments lui sont indispensables (phosphore, azote, …). Pour la pérennité de ces ressources, il faut absolument qu'une partie revienne sous forme matière dans le sol (tout ne peut pas partir en fumée ou en déchets inertes).

Le projet Torplant recourt au procédé de torréfaction. Il s'agit d'un prétraitement thermique qui diminue la teneur en oxygène de la biomasse traitée, augmente son homogénéité et son pouvoir calorifique, rendant possible une utilisation en tant que combustible solide de haute valeur. La torréfaction améliore considérablement la biomasse ligneuse telle que le bois en la rendant hydrophobe[11] et en augmentant son pouvoir calorifique. La torréfaction donne un produit « intermédiaire » qui s'insère dans la filière du bois-énergie.

En plus de la torréfaction, d'autres recherches ou développements sont en cours dans le domaine de la valorisation de la biomasse : par exemple la pyrolyse (cf. glossaire), dont le principal problème réside dans le fait qu'elle mobiliserait beaucoup de ressources pour être efficiente (environ 40% du reste du potentiel bois-énergie du canton), des projets de gazéification (cf. glossaire), qui pourraient s'avérer intéressants en cas de couplage chaleur force ou d'utilisation pour la mobilité, ou encore le séchage et la pelletisation sur site de déchets de biomasse au moyen d'unités mobiles. Il est donc important de prendre en considération la situation actuelle ainsi que les autres valorisations possibles de la biomasse lors de l'évaluation du projet Torplant.

Ressource bois valorisable dans le Canton de Vaud

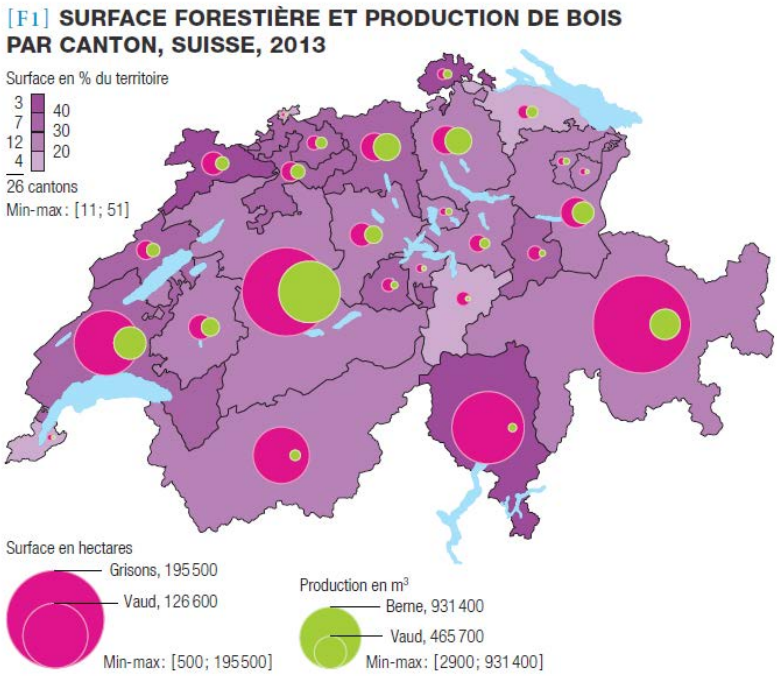
En ce qui concerne le bois en particulier, la ressource potentiellement valorisable en énergie est elle-même variée (bois de forêt, rémanents de coupe, déchets de scierie, déchets verts, etc.) et pourrait être exploitée par la torréfaction.

Statistique Vaud indique que la forêt vaudoise s'étend sur 126'600 hectares et représente un dixième des surfaces forestières suisses. L'exploitation de bois atteint 465'700 m^3 en 2013 et place le canton au deuxième rang national (cf. Figure 10 ci-dessous). Le bois reste principalement acheminé vers les scieries (56 %) mais la filière énergie progresse (37 % en 2013, sans compter les pellets utilisés dans les chaudières qui sont inclus dans le bois livré aux scieries). Le solde est utilisé pour la production de papier ou de panneaux de particules et de fibres.

[11] qui ne se laisse pas mouiller par l'eau

Comme mentionné en août 2015 par le Conseil d'Etat dans sa réponse à l'interpellation Andreas Wüthrich et consorts[12], quatre études[13] ont été menées par la DIREN depuis 2008, permettant d'établir notamment un diagnostic précis du potentiel de la ressource ainsi que du volume annuel mobilisable[14] des forêts vaudoises.

Figure 10 : Surface forestière et production de bois par canton, Suisse, 2013



Source : *Numerus 1-2015, Stat-VD*

Le bois de forêt mobilisable du canton de Vaud en plus de l'utilisation actuelle, évalué une première fois en 2008 dans le rapport BoisEau, puis mis à jour dans l'étude du bureau Quantis (cf. note 13) en intégrant les bois d'industrie, de sciage, de compostières, etc., est estimé à environ 114'730 t/an, ce qui représente un potentiel énergétique valorisable de 605 GWh/an (cf. Tableau 2), soit environ 1/30 de la consommation d'énergie finale annuelle du canton de Vaud (environ 18'000 GWh/an) :

[12] 15_INT_382, Interpellation Andreas Wüthrich et consorts – Assez de bois pour tout le monde dans notre canton ?

[13] Projet BoisEau, volet forestier : « Analyse du potentiel de bois énergie disponible dans les forêts vaudoises », 2008.
« Développement du bois énergie – Installations de chauffage », bureau Bonnard et Gardel, 2013.
« Analyse des systèmes de transformation du bois énergie », bureau Quantis, 2015.
« Etude du potentiel bois énergie et des coûts d'approvisionnement », bureau Xylon, en cours de finalisation au moment de l'audit.

[14] Trois niveaux de gisement de bois-énergie peuvent être définis (Rapport VIRAGE R5, 2010, http://archive-ouverte.unige.ch/unige:23298) :

- Le **gisement brut** représente le flux annuel estimé d'une ressource exploitée de façon pérenne.
- Le **gisement accessible** est la part du gisement brut réellement valorisable. Il tient compte de critères sociaux et techniques (morcellement foncier, contraintes écologiques, accessibilité physique...).
- Le **gisement mobilisable** est la part du gisement accessible après déduction des ressources déjà utilisées par des filières en place (matière et/ou énergie), en privilégiant une utilisation en cascade du bois.

Tableau 2 : Potentiel disponible valorisable de la ressource biomasse

	Tonnage anhydre [t/an]	Contenu énergétique [GWh/an]
Bois de forêt	**67'935**	**358**
• dont bois d'industrie	*22'436*	*118*
• dont disponible forêt	*34'965*	*184*
• dont dérivé de la filière bûche	*10'534*	*56*
Bois sciage (connexes)	**7'686**	**41**
Bois usagé	**27'955**	**147**
Bois de prairie	**8'648**	**46**
Bois de compostière	**2'506**	**13**
Total	**114'730**	**605**

Source : *« Stratégie bois-énergie du Canton de Vaud : analyses de scénarios de développement d'installations de transformation du bois-énergie », Quantis, 2016*

Comme relevé dans la réponse du Conseil d'Etat à l'interpellation mentionnée ci-dessus, « Bien que les réserves de bois soient actuellement suffisantes et que l'exploitation puisse être encore augmentée, le Canton se doit d'acquérir une vision claire de la pression exercée sur la ressource afin de pouvoir mettre en œuvre, le cas échéant, des leviers d'action pour réguler l'expansion des projets si besoin est. Cet objectif fait l'objet de la stratégie cantonale du bois énergie » qui était encore en cours d'élaboration au moment de l'audit.

Valorisation énergétique du bois

En ce qui concerne la transformation de la ressource, la conversion du bois en énergie est plus difficile que celle de combustibles non renouvelables tels que le gaz ou le mazout, disponibles sous forme d'énergie finale, tout particulièrement pour la production d'électricité. Les processus associés sont en effet souvent complexes, ce qui péjore quelque peu les rendements. (cf. Tableau 3 ci-dessous).

Tableau 3 : Récapitulatif des différentes technologies sur le marché pour la valorisation énergétique du bois

		Technologie	Fluide	Gamme de puissance	Rendement électrique	Rendement global annuel max	Etat de la filière	Comportement à charge partielle	Avantages	Inconvénients
VOIE THERMIQUE		Appareil domestique	eau chaude	<10 kWth	-	70-85%	éprouvé	moyen	simplicité des installations	
		Chaudière collective	eau chaude	>500 kWth	-	80%	éprouvé	moyen		
	CHAUDIERE + ...	Turbine vapeur	vapeur	>1 MWe			éprouvé	moyen		
		-contre-pression		1<P<5 5<P<10	12-15% 15-20%	75%			coût	rdt élec. limité par la thermodynamique
		-condensation		1<P<5 5<P<10	15-20% 20-25%	30%			rdt élec.	valorisation thermique difficile (basste t°)
		-combinaison des 2		>10 MWe	+5%					coût élevé à petite P
		-soutirage		>qq 10 MWe	+5%	-5%			usages thermiques possibles	coût élevé à petite P
		Moteur à Vapeur	vapeur	<1.5 MWe	5-15%	75%	éprouvé	bon		coût d'exploitation élevé
		Cycle Organique de Rankine (ORC)	huile thermique	<3 MWe	10-16%	75%	éprouvé	moyen	pas de cycle à haute pression (huile thermique)	coût rdt élec. limité
		Moteur Stirling	air chaud	<150 kWe	10-20%	80%	démonstration	bon	possible à petite P	coût
VOIE THERMO-CHIMIQUE		Gazéification +	gaz de synthèse				démonstration			
		- moteur à gaz		>100 kWe	20-30%	80%		bon		
		- turbine à gaz		>1 MWe	20-30%	80%		moyen		
		- cycle combiné		>qq 10 MWe	30-40%	85%		moyen		coût élevé à petite P
		- injection réseau gaz ou carburant							valorisation découplée de la production	coût élevé à petite P

Remarque : tous les rendements sont exprimés selon l'énergie utile (autoconsommation déduite) rapportée à la ressource entrante.

Source : *Concept biomasse 1 , 2011, http://archive-ouverte.unige.ch/unige:28946*

La torréfaction, comme d'ailleurs la pyrolyse, permet de disposer d'un produit intermédiaire qui peut s'inscrire aussi bien dans les voies thermique que thermochimique, représentées dans le tableau 3. Elle y apporte une valeur ajoutée dans le processus de transformation du bois en énergie. Pour ce qui est de la voie thermique, la torréfaction favorise principalement le stockage, la qualité de la combustion et permet d'augmenter la densité énergétique du combustible. S'agissant de la voie thermochimique, le bois torréfié facilite beaucoup le processus chimique de transformation du bois en biogaz (ce dernier constituant l'équivalent renouvelable du gaz naturel). La valorisation de l'énergie et des coproduits issus de la transformation de la biomasse en énergie est une étape clé dans la réussite d'un projet dans la mesure où, sauf si on part d'une ressource déchet, elle constitue l'unique apport financier devant permettre d'atteindre une certaine rentabilité. Les coûts à financer lors de cette étape sont :

- L'approvisionnement en bois et son stockage ;
- L'amortissement du coût du transformateur, son entretien, sa maintenance et le coût des énergies auxiliaires utilisées ;
- L'amortissement du coût de l'infrastructure propre de valorisation comme un réseau de chaleur, son entretien, sa maintenance, le coût des énergies auxiliaires utilisées et ceux liés à la facturation.

Dans certains cas, comme lors de la création d'un chauffage à distance, les investissements nécessaires à la valorisation peuvent représenter une part importante du total. Le prix de la matière n'est donc pas le seul élément à prendre en considération.

NATURE DU PROJET

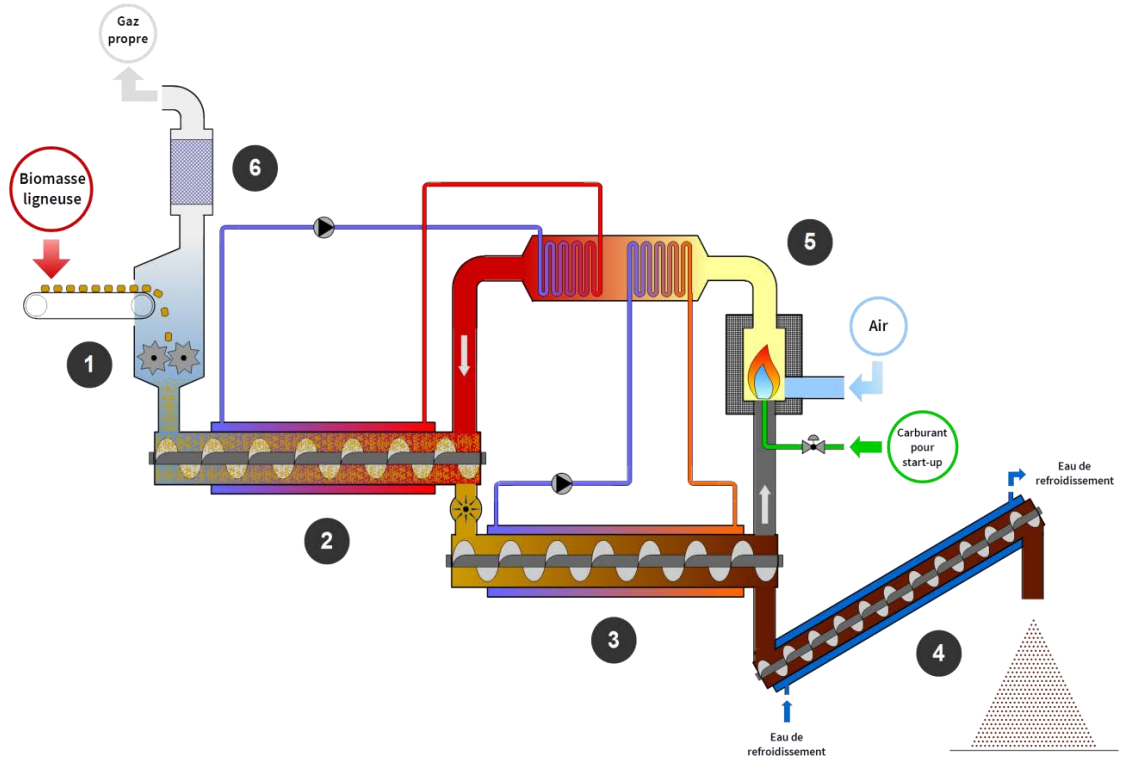
Préalablement au projet Torplant, l'Institut de Génie Thermique (IGT) de la HEIG-VD, au travers de son groupe de recherche Systèmes industriels de Bioénergie, avait développé un prototype de laboratoire bénéficiant du financement de l'OFEN et des Services industriels de Genève. Des études de combustion de pellets produits à partir de bois torréfié ont été menées depuis 2008 ; cette première phase s'est terminée en 2013 avec la construction et les essais d'un prototype pour la torréfaction en continu de diverses sources de biomasse d'une capacité de 5 kg/h (l'objectif était de 2-20 kg/h). Ce prototype de torréfaction en continu de divers rebus de bois et déchets verts a permis d'évaluer la faisabilité technique et économique du procédé.

Torplant a consisté en la poursuite du projet par la HEIG-VD afin de développer un système de torréfaction commercialisable, destiné à la valorisation de la biomasse ligno-cellulosique issue notamment de rémanents forestiers, déchets verts, résidus de méthanisation, de l'agriculture ou de l'horticulture, etc. Le projet analysé dans le cadre du présent audit constitue donc une deuxième phase de développement par la HEIG-VD. Ce système est illustré par la Figure 11 ci-dessous.

Selon le descriptif de projet, les pellets de bois torréfié permettraient un gain de place de 33% par rapport aux pellets classiques pour une même quantité d'énergie stockée. Au final, on utiliserait moins d'énergie pour produire les pellets torréfiés (pour une même énergie finale livrée au consommateur) et les coûts de production et de livraison seraient réduits de 20 à 30%. Une biomasse brute de basse qualité pourrait ainsi être transformée en combustible possédant

des propriétés bien adaptées au stockage, à la combustion ou à la gazéification et également à la densification et au transport sous forme de pellets.

Figure 11 : Schéma de fonctionnement de l'installation Torplant



1. Le matériau est introduit par une bande transporteuse spécifique dans un broyeur pour produire des copeaux de taille plus petite (40 - 60 mm).
2. La biomasse est transférée dans un sécheur qui est chauffé par des gaz de combustion et de l'huile thermique. La teneur en humidité de la biomasse diminue en dessous de 5%.
3. Ensuite, la biomasse entre dans le torréfacteur et est chauffée lentement dans des conditions anoxiques, à une température comprise entre 210 et 250 ° C en fonction de la qualité de la biomasse brute.
4. Puis les produits torréfiés sont refroidis rapidement pour être stockés. Ils pourraient aussi être introduits dans une unité de granulation.
5. Les gaz de torréfaction sont valorisés par combustion pour chauffer l'huile thermique.
6. Pour assurer des rejets propres, les gaz d'échappement traversent un catalyseur (non installé sur le pilote), puis sont libérés dans l'atmosphère.

Source : *Granit Technologies and Engineering (GRT) SA*

Le descriptif de projet énonce les objectifs techniques et commerciaux. Premièrement, il s'agissait de réaliser, à partir des prototypes développés à la HEIG-VD, une installation pilote de torréfaction de la biomasse d'une capacité de 100 kg/h, produisant principalement des pellets (pour le chauffage) mais également de l'électricité (grâce aux gaz de torréfaction) et de la chaleur. Torplant devait se composer d'une unité de séchage et torréfaction intégrée de biomasse et des équipements annexes qui permettent la production de pellets, d'énergie thermique et électrique verte. Le projet prévoyait également la réalisation d'essais dans une large gamme de conditions (matières premières, conditions opératoires) pouvant être rencontrées dans le marché.

Deuxièmement, il était prévu d'amener la technologie à l'étape de commercialisation : « A la fin du projet pilote, le projet Torplant entrera en phase de commercialisation. Il n'y aura pas besoin d'investissements supplémentaires en recherche et développement ».

PARTENAIRES

Au démarrage du projet, la HEIG-VD n'avait pas encore identifié les entreprises qui seraient mandatées pour la construction du torréfacteur et du système de polygénération avec couplage chaleur force. Durant les premiers mois du projet, la Haute Ecole a identifié plusieurs fournisseurs potentiels et leur a demandé de présenter des plans d'exécution et des offres. Une analyse des six offres reçues a mis en évidence les avantages et inconvénients de chacune, qui ont été discutés avec le comité de suivi/contrôle des projets lors de la visite de février 2014.

La Haute Ecole a écarté les offres dont le coût dépassait le budget disponible ainsi que les solutions qui n'étaient pas matures ou posaient des problèmes techniques. La HEIG-VD a finalement collaboré avec deux partenaires pour la fabrication et les tests de l'unité pilote Torplant. Elle a choisi de « co-construire » l'unité pilote avec Granit Technologies and Engineering (GRT) SA (ci-après GRT SA) et Ökozentrum plutôt que d'en sous-traiter entièrement la fabrication à une entreprise comme cela avait été envisagé au début, sur la base des considérations suivantes énumérées dans le rapport final de la HEIG-VD :

- GRT SA et Ökozentrum étaient déjà des partenaires du projet et le développement conjoint d'un système intégré apportait une technologie unique avec plusieurs brevets potentiels, indispensables au succès d'une future start-up.
- GRT SA était le seul partenaire et fournisseur vaudois dont le savoir-faire correspondait aux spécifications du projet.
- Ökozentrum était le seul partenaire en Suisse et même en Europe dont la technologie et le savoir-faire pour la valorisation de gaz pauvres et difficiles donnait les garanties nécessaires.
- La réalisation de l'installation impliquait la commande de nombreuses fournitures et composants (les prévisions montraient qu'environ 54% proviendraient du canton et région et 28% du reste de la Suisse).

Lors de la revue du comité de suivi du 20 février 2014 qui a abouti au choix de GRT SA, en regard des aspects positifs résumés ci-dessus figuraient également les faiblesses suivantes[15] :

- « *Scale-up*[16] au-delà de 500 kg/h semble infaisable.
- Peu d'expérience avec la torréfaction (seulement via la HEIG-VD à l'échelle de laboratoire).
- Le séchoir et le torréfacteur sont construits sur mesure (adaptations de concepts existants).
- Délais de construction (9 mois).
- Electronique de contrôle relativement chère. »

[15] Source : Présentation HEIG-VD de la réunion de suivi du 20.02.2014
[16] Augmentation des performances par amélioration des équipements.

Les rôles de chacun des intervenants étaient les suivants :

HEIG-VD

La HEIG-VD ayant réalisé un premier prototype de laboratoire, la Haute Ecole a assuré la direction du projet, réalisé les études, préparé et exécuté les essais, fait les analyses physico-chimiques et rédigé les rapports. Elle était également responsable de la promotion, du marketing et des aspects de commercialisation du torréfacteur.

Granit Technologies and Engineering (GRT) SA

Cette entreprise, basée au Technopôle d'Orbe, est active dans l'étude de projets, la réalisation et le commerce d'équipements destinés à la protection de l'environnement et au recyclage industriel, notamment par traitement des effluents liquides au moyen d'oxydation par voie humide, ainsi que le service après-vente afférent à de tels équipements, et la valorisation des sous-produits contenus dans les effluents traités.

Initialement, GRT SA devait simplement héberger l'unité pilote sur le technopole d'Orbe et assister la HEIG-VD dans le marketing et la commercialisation. Au cours du projet, GRT SA est devenu un partenaire à part entière en participant activement au développement, à la construction et aux tests de l'unité pilote, investissant également une partie des fonds nécessaires à la réalisation de ce projet.

Ökozentrum

Cette institution, basée à Langenbruck (BL), œuvre dans le domaine des énergies renouvelables et assure la promotion de technologies novatrices en matière de protection de l'environnement et de climat. En outre, elle propose au public des cours pratiques destinés à le sensibiliser à ces problèmes et à l'orienter vers une utilisation modérée de l'énergie et une consommation durable.

Dans le cadre de ce projet, Ökozentrum a fourni le sous-système de valorisation thermique et mécanique du gaz pauvre libéré durant le processus de torréfaction (Torgaz) par combustion et turbinage.

Au départ du projet, deux systèmes de cogénération de chaleur et d'électricité (CCF) étaient envisagés :

- une turbine à gaz de type A-ACTOR (couplage avec brûleur Flox) développée par Ökozentrum, qui a finalement été choisie,
- un cycle de Rankine à fluide organique (ORC).

2. L'OBJECTIF ET L'APPROCHE DE L'AUDIT

La Cour des comptes s'est saisie elle-même du sujet de l'audit en raison

- des montants financiers en jeu : 100 millions de francs pour l'ensemble du programme, davantage si l'on tient compte des effets multiplicateurs pour l'économie vaudoise ;
- de l'importance du thème de l'efficacité énergétique et des énergies renouvelables, compte tenu des stratégies énergétiques fédérale et cantonale (mesure n° 4.4 du Programme de législature 2012-2017[17]).

Cet audit de performance porte sur l'efficacité des subventions. Dans la mesure où les résultats énergétiques impactent l'environnement, l'audit porte également sur la durabilité.

Un premier rapport sur le domaine A « Efficacité énergétique » du programme des 100 mios a déjà été publié en mai 2017.

2.1. L'ÉTENDUE

L'audit a porté sur deux des neuf projets de recherche financés dans le cadre du domaine C du programme des 100 mios : le projet Leclanché de l'EPFL et le projet Torplant de la HEIG-VD.

Les deux projets de recherche analysés abordent la question énergétique chacun sous un angle différent (voir système technologique et système énergétique en annexe II) :

- **Le projet HEIG-VD – Torplant** se focalise principalement sur le **développement technologique** qui permet de transformer de la biomasse ligneuse / déchets en plaquettes ou pellets torréfiés, plus denses en énergie et plus commodes d'usage. Les objectifs sont liés directement à l'amélioration du **fonctionnement** de la technologie ainsi qu'aux aspects économiques du torréfacteur et des produits.
- **Le projet EPFL – Leclanché** s'intéresse quasi exclusivement à l'**usage dans le système de distribution électrique** d'un produit déjà bien développé (la batterie lithium-ion titanate) et à son intégration.

La Cour a exclu du champ du présent audit les frais de gestion relatifs à la gestion des projets de recherche, inclus dans le volet E.1 du programme (cf. Tableau 1, page 10).

2.2. L'OBJECTIF DE L'AUDIT

L'objectif de l'audit est de répondre à la question principale suivante :

Les subventions aux projets *HEIG-VD – Torplant* et *EPFL – Leclanché* contribuent-elles à l'atteinte des objectifs de développement des énergies renouvelables et de soutien du tissu économique vaudois ?

[17] « Développer les énergies renouvelables, garantir la sécurité de l'approvisionnement, favoriser les économies d'énergie ».

2.3. LES AXES DE L'AUDIT

Pour répondre à la question principale d'audit, les axes et sous-questions suivants ont été définis.

AXE 1 : PROJET EPFL – LECLANCHÉ :

LE PILOTAGE DU PROJET	
Question n°1	**La performance attendue du projet EPFL – Leclanché était-elle clairement définie ?**
Question 1.1	Les objectifs du projet étaient-ils formulés de manière satisfaisante ?
Question 1.2	Le descriptif de projet était-il suffisamment détaillé pour permettre à la DIREN de juger des résultats attendus ?
Question n°2	**La DIREN a-t-elle exercé un suivi et un contrôle satisfaisants de la performance du projet Leclanché ?**
Question 2.1	Un suivi satisfaisant a-t-il été effectué afin de s'assurer que les résultats obtenus correspondent aux objectifs fixés ?
Question 2.2	Le projet de recherche a-t-il respecté le budget et les délais prévus ?
Question 2.3	En cas d'écart constaté en cours de projet, les mesures prises ont-elles permis de remédier aux problèmes ?
Question 2.4	Des contrôles ont-ils été effectués pour s'assurer que les résultats atteints correspondent aux objectifs fixés ?
LA CONTRIBUTION AU DÉVELOPPEMENT DES ÉNERGIES RENOUVELABLES	
Question n°3	**Le projet Leclanché contribue-t-il au développement des énergies renouvelables en permettant de stocker l'énergie électrique ?**
Question 3.1	Le projet a-t-il permis d'améliorer la technologie disponible ?
Question 3.2	La technologie développée dans le cadre du projet contribue-t-elle à une meilleure valorisation des énergies renouvelables ?
Question 3.3	Le projet donne-t-il lieu à des produits commercialisables ?
Question 3.4	Le logiciel et le container développés dans le cadre du projet Leclanché permettent-ils le stockage de l'électricité à un coût « concurrentiel » ?
Question 3.5	Les impacts environnementaux empêchent-ils le développement de cette technologie ?
LE SOUTIEN DU TISSU ÉCONOMIQUE VAUDOIS	
Question n°4	**Le subventionnement du projet Leclanché contribue-t-il au soutien du tissu économique vaudois ?**
Question 4.1	L'effet multiplicateur économique est-il conforme aux prévisions ?

AXE 2 : PROJET HEIG-VD – TORPLANT :

LE PILOTAGE DU PROJET	
Question n°5	**La performance attendue du projet HEIG-VD – Torplant était-elle clairement définie ?**
Question 5.1	Les objectifs du projet étaient-ils formulés de manière satisfaisante ?
Question 5.2	Le descriptif de projet était-il suffisamment détaillé pour permettre à la DIREN de juger des résultats attendus ?
Question n°6	**La DIREN a-t-elle exercé un suivi et un contrôle satisfaisants de la performance du projet Torplant ?**
Question 6.1	Un suivi satisfaisant a-t-il été effectué afin de s'assurer que les résultats obtenus correspondent aux objectifs fixés ?
Question 6.2	Le projet de recherche a-t-il respecté le budget et les délais prévus ?
Question 6.3	En cas d'écart constaté en cours de projet, les mesures prises ont-elles permis de remédier aux problèmes ?
Question 6.4	Des contrôles ont-ils été effectués pour s'assurer que les résultats atteints correspondent aux objectifs fixés ?
LA CONTRIBUTION AU DÉVELOPPEMENT DES ÉNERGIES RENOUVELABLES	
Question n°7	**Le projet Torplant contribue-t-il au développement des énergies renouvelables ?**
Question 7.1	Le projet a-t-il permis d'atteindre les objectifs fixés en termes d'innovation ?
Question 7.2	La technologie développée dans le cadre du projet contribuera-t-elle aux objectifs de développement des énergies renouvelables ?
Question 7.3	Le projet donnera-t-il lieu à des produits commercialisables ?
Question 7.4	Le projet Torplant rendra-t-il le coût de production et de livraison des pellets et plaquettes torréfiés inférieur à celui des pellets standards ?
Question 7.5	Le Torgaz sera-t-il suffisamment rentable pour être valorisé ?
Question 7.6	Les impacts environnementaux empêchent-ils le développement de cette technologie ?
LE SOUTIEN DU TISSU ÉCONOMIQUE VAUDOIS	
Question n°8	**Le subventionnement du projet Torplant contribue-t-il au soutien du tissu économique vaudois ?**
Question 8.1	L'effet multiplicateur économique est-il conforme aux prévisions ?

2.4. L'APPROCHE

La Cour a conduit ses travaux conformément à sa méthodologie et à son « *Code de déontologie et Directives relatives à la qualité des audits* ». Ceux-ci respectent les normes de contrôle de l'Organisation Internationale des Institutions Supérieures de Contrôle des Finances Publiques (INTOSAI).

L'équipe d'audit était composée de M. Denys Neier, directeur d'audits et de Mme Patricia Girardbille, cheffe de mandats d'audit. Dans le cadre de ses travaux, la Cour a fait appel à des experts du domaine concerné.

LA COLLECTE ET L'ANALYSE DES INFORMATIONS

La collecte des informations s'est déroulée de décembre 2016 à avril 2017.

Les éléments probants constituant la base sur laquelle reposent les conclusions de l'audit ont été établis, en fonction des questions d'audit développées pour chacun des axes de l'audit, dans le cadre des procédures suivantes :

- **L'examen des principales lois et autres textes de référence applicables**

Les bases légales de référence sont la Loi sur les subventions du 22 février 2005 (LSubv), la Loi sur l'énergie du 16 mai 2006 (LVLEne) et le Règlement du Fonds pour l'énergie du 4 octobre 2006 (RF-Ene).

Pour la LVLEne, il s'agit en particulier des articles suivants :

- Art. 1 al. 2 : [La loi] encourage l'utilisation des énergies indigènes, favorise le recours aux énergies renouvelables, soutient les technologies nouvelles permettant d'atteindre ses objectifs et renforce les mesures propres à la réduction des émissions de CO_2 et autres émissions nocives.
- Art. 34 : L'Etat peut soutenir les centres de formation des spécialistes de l'énergie et inciter les administrations cantonale et communales à se perfectionner dans cette branche.
- Art. 36 : L'Etat met en œuvre ou favorise des projets pilotes et de démonstration sur le plan énergétique lorsque ceux-ci apparaissent comme significatifs.
- Art. 40a : Le département peut subventionner les activités qui répondent à la politique énergétique cantonale.
- Art. 40k : Les mesures prises en application de la présente loi peuvent faire l'objet d'une subvention notamment (…) les projets pilotes et de démonstration (…).
- Art. 40h : La subvention est fixée sur la base de l'effort financier consenti par le bénéficiaire, de l'impact énergétique de la mesure et de son effet d'exemplarité. (…)

La Conception cantonale de l'énergie (COCEN), actualisée en 2011, qui a servi de base à la LVLEne, est également un texte de référence cantonal en matière d'énergie renouvelable.

- **Des entretiens avec les différentes parties concernées**

Au cours d'entretiens ou de séances de travail, la Cour a rencontré le Directeur général de l'environnement, le Directeur de la DIREN ainsi que les collaborateurs de la DIREN, désignés comme personnes de référence pour le suivi du programme des 100 mios et en particulier pour la gestion du domaine C.

De plus, l'équipe d'audit, accompagnée par ses experts, a effectué des visites sur site et s'est entretenue avec les porteurs de projets concernés : les Professeurs responsables et les Doctorants de l'EPFL et des représentants de l'entreprise Leclanché pour le premier projet ; le Professeur responsable de la HEIG-VD et des représentants de l'entreprise GRT SA pour le second projet.

Premièrement, ces entretiens avaient pour but de comprendre et d'analyser le suivi effectué par la DIREN sur les projets du domaine C, en particulier pour les deux projets audités. Deuxièmement, ils ont permis d'observer les résultats atteints afin de déterminer dans quelle mesure ces deux projets ont contribué aux deux objectifs principaux du programme des 100 mios et aux objectifs spécifiques fixés pour les projets de recherche.

- **L'examen et l'analyse des pièces et documents**

Les audités ont fourni des documents permettant d'attester leurs dires et/ou de compléter les informations transmises lors des entretiens. Dans ce cadre, plus de 400 documents ont été remis à l'équipe d'audit. Pour les deux projets audités, il s'agit principalement de la documentation suivante :

- Conventions de subventionnement
- Descriptifs de projets et leurs avenants
- Contrats des Hautes Ecoles avec les partenaires
- Rapports semestriels technique & commercialisation et autres rapports techniques, business plans, etc.
- Rapports financiers semestriels, notes d'audit de la DGE, comptes audités et rapports des organes de révision
- Rapports des visites de laboratoires et présentations préparées par les Hautes Ecoles pour ces visites
- Articles scientifiques publiés
- Rapports du COPIL HEIG-VD pour le projet Torplant
- Principaux échanges (courriers, emails) entre la DIREN et les Hautes Ecoles
- Communiqués de presse
- Rapports finaux des projets rédigés par les Hautes Ecoles.

- **La contribution d'experts**

Dans le cadre de ses travaux, la Cour a fait appel à des experts dans le domaine de la recherche sur les énergies renouvelables.

LES CONCLUSIONS ET LE RAPPORT

Une fois la collecte et l'analyse des informations probantes finalisées, les constats et recommandations ont été formulés dans une démarche qui se veut constructive afin d'amener une valeur ajoutée.

La Cour formule les réserves d'usage pour le cas où des documents, des éléments ou des faits ne lui auraient pas été communiqués, ou l'auraient été de manière incomplète ou inappropriée, éléments qui auraient pu avoir pour conséquence des constatations et/ou des recommandations inadéquates.

Le processus a été ensuite celui appliqué à tous les audits de la Cour. La séance de clôture qui s'est tenue le 26 septembre 2017 a permis de restituer les conclusions de l'audit et de présenter les recommandations à la DIREN.

Le projet de rapport a été approuvé par la Cour le 10 octobre 2017 puis adressé à la DIREN le 13 octobre afin que celle-ci puisse formuler ses remarques (délai de 21 jours). Ces remarques sont reproduites aux pages 84 à 87 du présent rapport.

La Cour délibérant en séance plénière en date du 15 novembre 2017 a adopté le présent rapport public en présence de Mme Eliane Rey, présidente, Mme Anne Weill-Lévy et M. Frédéric Grognuz, vice-présidents.

La Cour rappelle que le présent rapport est destiné à analyser une situation et à informer le public. Il ne saurait interférer ou se substituer à des enquêtes administratives ou pénales.

3. LES RÉSULTATS DE L'AUDIT : PROJET EPFL – LECLANCHÉ

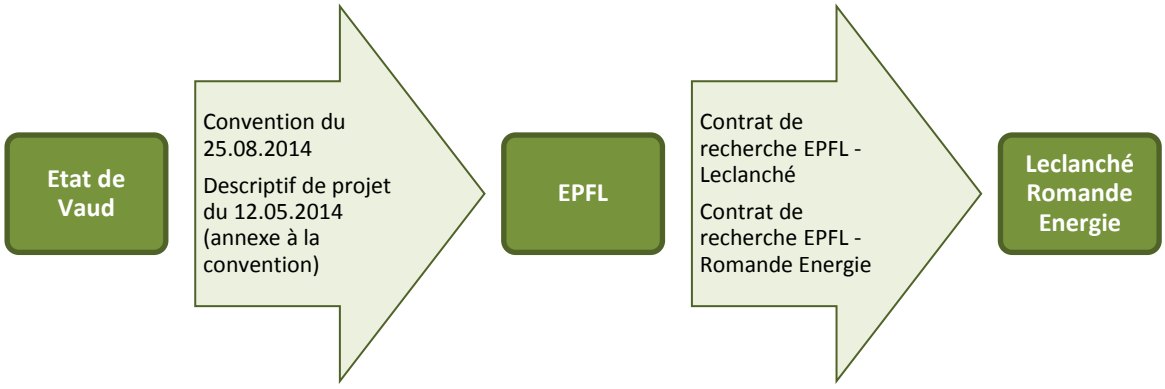
3.1. LE PILOTAGE DU PROJET

3.1.1. LE CADRE CONTRACTUEL

Le financement du projet de l'EPFL est octroyé par le biais d'une convention de subventionnement à laquelle est annexé un descriptif de projet rédigé par l'EPFL. Celui-ci vaut demande de financement et constitue le document clé de référence pour le suivi du projet et l'évaluation des résultats.

L'Etat de Vaud n'a de relations contractuelles qu'avec l'EPFL. Cette dernière a assumé la direction opérationnelle du projet, ainsi que sa gestion administrative et financière. L'EPFL avait l'obligation de passer des conventions avec tous les tiers et partenaires participant au projet.

Figure 12 : Cadre contractuel du projet EPFL – Leclanché



Les flux financiers suivent la même logique : l'Etat de Vaud verse les montants à l'EPFL, qui transfère à Leclanché les montants qui lui reviennent alors que Romande Energie finance le salaire d'un doctorant de l'EPFL travaillant sur le projet.

La convention EPFL – Etat de Vaud prévoit qu'en cas de succès commercial significatif obtenu en tout ou partie grâce aux résultats du projet, l'Etat de Vaud peut bénéficier d'une part des royalties et/ou des montants perçus par l'Ecole, en tenant compte des contributions respectives de chacune des parties.

3.1.2. LES OBJECTIFS

Question 1.1 **Les objectifs du projet étaient-ils formulés de manière satisfaisante ?**

Question 1.2 **Le descriptif de projet était-il suffisamment détaillé pour permettre à la DIREN de juger des résultats attendus ?**

Les objectifs opérationnels et les résultats attendus du projet sont énoncés de manière détaillée dans le descriptif du projet, avec un calendrier et des jalons, fournissant les bases nécessaires à la DIREN pour effectuer un suivi précis du projet.

Le projet EPFL – Leclanché, qui porte sur l'optimisation et la sécurité du réseau, favorise l'usage des énergies renouvelables spontanément variables (électricité de source éolienne ou solaire) et contribue indirectement aux objectifs de développement de ces énergies en leur assurant une utilisation optimale.

Lors du lancement du projet, l'impact escompté sur l'économie locale a été estimé en termes de création d'emplois et de génération d'affaires potentielles pour les partenaires.

1er objectif du domaine C : développement des nouvelles énergies renouvelables

La manière dont le projet EPFL – Leclanché contribue au développement des nouvelles énergies renouvelables est exposée clairement dans le descriptif de projet : en développant une installation grandeur nature, il s'agit de démontrer le bon fonctionnement d'un dispositif de stockage qui permette aux opérateurs de réseaux de distribution d'assurer un contrôle indirect de leur réseau ; cette technologie est développée spécifiquement pour le réseau de moyenne tension (pour des quartiers ou petites villes). Ceci est utile notamment en présence d'un grand nombre de sources de production décentralisée, ce qui est le cas avec l'augmentation de la part des nouvelles énergies renouvelables telles que le solaire et l'éolien dans le mix énergétique.

2e objectif du domaine C : soutien à l'économie locale

Ce projet devait constituer une vitrine technologique et un laboratoire permettant de tester en grandeur nature les bénéfices du système de stockage, ainsi que de servir de démonstrateur pour les clients potentiels. Il devait avoir un impact sur l'économie du canton et les retombées économiques prévues étaient les suivantes[18] :

1. **Emploi** : engagement de deux ingénieurs dans le cadre du projet et, à terme, création d'une dizaine d'emplois si la prospection et la vente du système s'étendent en Europe.
2. **Génération d'affaires dans les entreprises** : augmentation de la visibilité de la société Leclanché sur le marché national et international.
3. **Avantage pour le Canton de Vaud** : création possible d'un centre de compétence en stockage d'énergie réseau, retombées fiscales en lien avec le chiffre d'affaires généré.

Seule la création d'emplois probables a été chiffrée ; les autres objectifs ne sont pas suffisamment clairs et précis pour permettre une comparaison avec les résultats obtenus.

Descriptif de projet : objectifs opérationnels, résultats attendus et risques identifiés

Les différents éléments décrits ci-après ont fourni les bases nécessaires à la DIREN et aux experts qu'elle a mandatés pour se rendre compte des résultats attendus et effectuer un suivi précis.

[18] Annexe à la PCE du 17.05.2013 : « C.1 – Appui à des projets des Hautes Ecoles, projets de la HEIG-VD et de l'UNIL, vue d'ensemble », janvier 2013

Les objectifs opérationnels figurent comme suit dans le descriptif de projet sous la forme de résultats et produits finaux attendus[19] :

1. Réalisation du système de stockage pilote : container intégré commercialisable en l'état comportant un ensemble de modules lithium-ion titanate intégrés, ainsi que différents logiciels d'exploitation ;
2. Développement d'un système de collecte des informations et estimation d'état en temps réel du *feeder* du réseau électrique de l'EPFL auquel le système de stockage est connecté ;
3. Définition des algorithmes de gestion des systèmes de stockage pour l'écrêtage de pointes et les services système (réglage de tension du *feeder* et gestion de congestion dans les lignes, cf. glossaire) ;
4. Evaluation des prestations du système de stockage pour l'écrêtage du système et les services systèmes.

Le descriptif de projet contient un calendrier donnant des indications précises sur des livrables tangibles, avec des jalons pour les aspects techniques et pour les aspects commerciaux.

Une analyse détaillée des opportunités et risques du marché, des forces et faiblesses du projet ainsi qu'une analyse des risques du projet avec les conséquences et les mesures de limitation a également été menée par l'EPFL et est documentée dans le descriptif de projet. Elle a mis en évidence les éléments suivants :

- **Coûts** : un des aspects-clé de ce projet était de parvenir à un système industrialisable, c'est-à-dire répondant à des modes de production efficaces et également à des objectifs de coûts permettant de concurrencer d'autres solutions sur les marchés, tout en respectant diverses normes.
- **Valorisation des bénéfices** : les moyens demandés pour le projet étaient importants et concentrés sur une période de quelques années pour la partie de test ; ceci était déterminant pour bénéficier d'une avance concurrentielle. Il subsistait toutefois un risque que des concurrents parviennent plus rapidement sur le marché.
- **Technologie** : l'évolution rapide des technologies de stockage présente des risques d'obsolescence récurrents.

Par ailleurs, il était relevé qu'il s'agissait d'une première installation de cette envergure, de plus en regroupant plusieurs technologies inédites, ce qui augmentait le niveau de risque.

3.1.3. LE SUIVI DU PROJET ET LE CONTRÔLE DES RÉSULTATS

Question 2.1 **Un suivi satisfaisant a-t-il été effectué afin de s'assurer que les résultats obtenus correspondent aux objectifs fixés ?**

La DIREN a mis en place un système de contrôle permettant de suivre de manière rigoureuse l'avancement du projet tant du point de vue financier que scientifique, en bénéficiant de l'appui d'experts. Des visites sur site ont eu lieu pour observer les installations et obtenir des informations des porteurs de projets.

[19] Descriptif de projet, mai 2014 (annexe à la convention de subventionnement)

Le suivi du projet s'est déroulé conformément à ce qui était prévu et dans de bonnes conditions, car aussi bien les porteurs de projet que la DIREN ont fait preuve d'une grande transparence, de disponibilité et de professionnalisme.

Du soutien a été proposé ponctuellement par la DIREN aux porteurs de projet pour répondre aux besoins, notamment pour accompagner la création des start-ups.

SYSTÈME DE SUIVI MIS EN PLACE

La DIREN a mis en place un monitoring permettant d'assurer un suivi régulier et adéquat basé sur les éléments suivants :

- Dès le début, des rapports spécifiques doivent être fournis et impérativement justifier d'une démarche orientée vers la commercialisation (business plan, recherche de partenaires, etc.). La convention de subventionnement prévoit qu'un rapport d'avancement (technique, financier et commercialisation) soit soumis tous les six mois. Un audit des comptes est par ailleurs exigé annuellement. De plus, un rapport détaillé est requis à chacune des étapes techniquement significatives.
- L'évaluation des rapports et des projets (avec, en principe, une visite annuelle sur site) doit être réalisée par le chef de projet de la DIREN, accompagné d'un ou des experts mandatés (technique) ainsi qu'un représentant d'Innovaud (marketing). Ce groupe de suivi doit évaluer les projets sous l'angle de l'innovation.
- A la demande des porteurs de projet ou sur recommandation du représentant d'Innovaud, des spécialistes de l'innovation (coaches Platinn, CTI start-up, etc.) peuvent être mandatés pour les problématiques de la commercialisation. Cette intervention doit être gérée par le chef de projet de la DIREN et fait l'objet d'un budget spécifique prévu dans le volet E du programme des 100 mios.

En fonction des évaluations intermédiaires, la possibilité d'adapter, dans le cadre budgétaire, le projet pour mieux répondre aux objectifs du programme était aussi contractuellement prévue. Les bases légales et contractuelles prévoient un suivi financier strict et autorisent à redimensionner, voire interrompre le financement du projet s'il s'écarte trop des objectifs initiaux.

SUIVI RÉALISÉ

Examen des rapports reçus

Conformément à ce qui était prévu, l'EPFL a transmis régulièrement à la DIREN des rapports sur le déroulement du projet. Au cas par cas, des compléments d'informations ont été demandés.

Tableau 4 : Principaux rapports reçus par la DIREN pour le projet EPFL – Leclanché

Type de rapport	Prévu selon convention	Reçu effectivement
Rapports « technique & commercialisation »	3 mois après le début du projet (09/2014) puis semestriellement	• 31.12.2014 • 31.03.2015 • 30.11.2015 • 31.05.2016

Type de rapport	Prévu selon convention	Reçu effectivement
Rapports financiers	Semestriellement	• 30.11.2014 • 31.03.2015 • 30.09.2015 • 31.03.2016 • 31.10.2016
Comptes audités par un organe de révision externe	Annuellement	• Période 01.09.2014 – 31.03.2015 • Période 01.04.2015 – 31.03.2016 • Comptes finaux audités arrêtés au 31.10.2016, avec chiffrage des autres frais à venir (maintenance, extension de garantie, frais de démantèlement en 2025, solde TVA)
Rapport final	A la fin du projet	• 13.12.2016 : première version du rapport final • 20.03.2017 : version définitive du rapport final, validée par la DIREN

Source : *Cour des comptes sur la base des documents reçus dans le cadre de l'audit*

Les rapports « technique & commercialisation » (T&C) sont obligatoires pour tous les porteurs de projets de recherche financés dans le cadre du programme des 100 mios. Ils ont une structure standard définie par la DIREN et donnent une vision complète du projet, au travers des points suivants :

- Informations générales : récapitulatif sommaire des activités principales et événements particuliers de la période écoulée ;
- Aspects techniques : calendrier, principaux jalons, informations complémentaires ;
- Aspects marketing : calendrier, principaux jalons ;
- Evolution du projet : autres mesures prises, perspectives commerciales, besoin d'appui, concurrence, autres commentaires.

Les rapports T&C ont été délivrés conformément à ce qui était prévu jusqu'au rapport final.

Les rapports financiers contiennent une ventilation des coûts par nature (salaires, équipements et infrastructures et autres frais), pour la période et les montants cumulés. La répartition des coûts entre les différents contributeurs (Etat de Vaud, EPFL, Leclanché et Romande Energie) ainsi que la comparaison avec le budget sont incluses. Ces rapports financiers ont fait l'objet d'une analyse systématique de la part de la DIREN avant le versement des tranches de subventions.

Par ailleurs, la Division support (Finance) de la DGE a procédé à des contrôles sur la base des rapports financiers de mars 2015 et mars 2016 ainsi que sur les comptes finaux. Suite à ce dernier contrôle, il a été décidé de réduire le dernier acompte versé pour clore le projet, les montants à charge de l'Etat de Vaud se révélant inférieurs au budget (cf. paragraphe « Suivi financier » ci-dessous).

Visites et avis d'experts

Des visites sur site ont été effectuées semestriellement par le groupe de suivi composé des chefs de projets de la DIREN, d'un expert spécialisé dans la recherche énergétique et de conseillers en innovation (Innovaud) pour l'aspect de commercialisation.

Ces visites ont permis aux différentes parties prenantes d'échanger sur l'état d'avancement du projet, d'identifier les besoins de soutien (p.ex. pour le lancement de start-ups) et de prendre des mesures si des déviations étaient constatées par rapport à ce qui était prévu dans le descriptif de projet.

Dans trois des comptes rendus de visites, des appréciations ont été données par le groupe de suivi sur l'état d'avancement du projet par rapport à des critères scientifiques, technologiques et commerciaux (cf. Tableau 5). Le but de ces appréciations était de donner une vision synthétique de l'état d'avancement et d'encourager les porteurs de projets à poursuivre leurs efforts vers l'objectif fixé. Dans les faits, il s'est avéré que ces appréciations avaient peu d'impact sur l'avancement des projets et n'apportaient que peu de valeur ajoutée. Par conséquent, la DIREN a renoncé à poursuivre ces évaluations.

Tableau 5 : Rapports de visites et appréciations par les experts pour le projet EPFL – Leclanché

Date de la visite sur site	Critères d'appréciation[20]		
	Scientifique	Technologique	Commercial
01.10.2014	A	A	B
10.02.2015	A	A	B
13.10.2015	A	A	A
16.02.2016	-	-	-
05.10.2016	-	-	-

Sources : *Rapports de visites*

Question 2.2 **Le projet de recherche a-t-il respecté le budget et les délais prévus ?**

Dans les grandes lignes, le projet s'est déroulé tel que planifié. Il n'a pas connu de problèmes ou de retards importants. Ce projet a été très bien géré par l'équipe de l'EPFL.

La subvention de l'Etat de Vaud effectivement versée est légèrement en-dessous du montant budgété. L'EPFL et Leclanché ont contribué de manière plus importante que prévu en consacrant davantage d'heures sur le projet que celles initialement annoncées.

Suivi financier

A la date du présent audit, le projet EPFL – Leclanché est terminé ; la dernière tranche de subvention a été versée le 23 mai 2017, suite à la remise par l'EPFL du rapport final. La subvention totale versée s'élève à CHF 1'960'072.

[20] Critères d'appréciation à satisfaire pour obtenir un A (un « sous-critère » non satisfait entraîne un B ; deux « sous-critères » non satisfaits entraînent un C) :
Scientifique : a/ Particulièrement innovant. b/ Bases scientifiques maîtrisées.
Technologique : a/ Technologie maîtrisée. b/ Equipe, organisation et management de projet performants. c/ Ressources adaptées et disponibles.
Commercial : a/ Produit proche de la maturité. b/ Existence manifeste d'un marché. c/ Conditions de commercialisation favorables (partenaire, start-up, etc.)

Sur la base de l'analyse des rapports financiers préparés par l'EPFL et les partenaires du projet, les divers échanges entre l'Ecole et la DIREN, ainsi que sur le rapport de la Division support (Finance) de la DGE portant sur les rapports financiers de mars 2015 et mars 2016, la Cour formule les observations qui suivent :

- Le budget prévu a été respecté pour la part de l'Etat de Vaud et pour Romande Energie ; il y a eu un léger dépassement pour l'EPFL et un dépassement plus important pour Leclanché.

Tableau 6 : Dépenses réelles comparées au budget pour le projet EPFL – Leclanché

Sources de financement	Budget initial	Coûts réels	Coûts réels %	Différence
Part Etat de Vaud	1'970'000	1'960'072	54.7%	-9'928
Contrib. EPFL	255'450	278'550	7.8%	23'100
Contrib. de Leclanché	1'009'600	1'094'772	30.5%	85'172
Contrib. de Romande Energie	252'750	252'750	7.0%	0
Total	**3'487'800**	**3'586'144**	**100%**	**98'344**

Sources : *Descriptif de projet et rapport final EPFL – Leclanché*

- La TVA sur le container a été omise dans le budget initial. Des échanges ont eu lieu entre le porteur de projet et la DIREN pour tenir compte de cet élément. Les ajustements nécessaires ont été apportés au budget dans le respect de l'enveloppe globale. Ce surcoût a été compensé par l'évolution favorable du taux de change CHF/EUR.
- Les dépassements de budget de l'EPFL et de Leclanché sont dus à un nombre d'heures des collaborateurs de Leclanché et des doctorants EPFL supérieures à celles planifiées. Seules les heures budgétées ont été mises à la charge de l'Etat de Vaud, les autres parties prenantes absorbant leurs dépassements.
- La part à charge de l'Etat s'est finalement révélée légèrement inférieure au montant budgété et la dernière tranche de subvention a été réduite de CHF 9'928.
- Il faut relever que la contribution de Leclanché inclut une extension de garantie de 8 ans, la maintenance sur la même période, les frais de démantèlement et la taxe de recyclage. Ces frais, pour un total d'environ CHF 500'000 (compris dans la contribution de Leclanché dans le Tableau 6 ci-dessus), ne sont pas encore versés à la fin du projet car ils surviendront dans les années à venir.

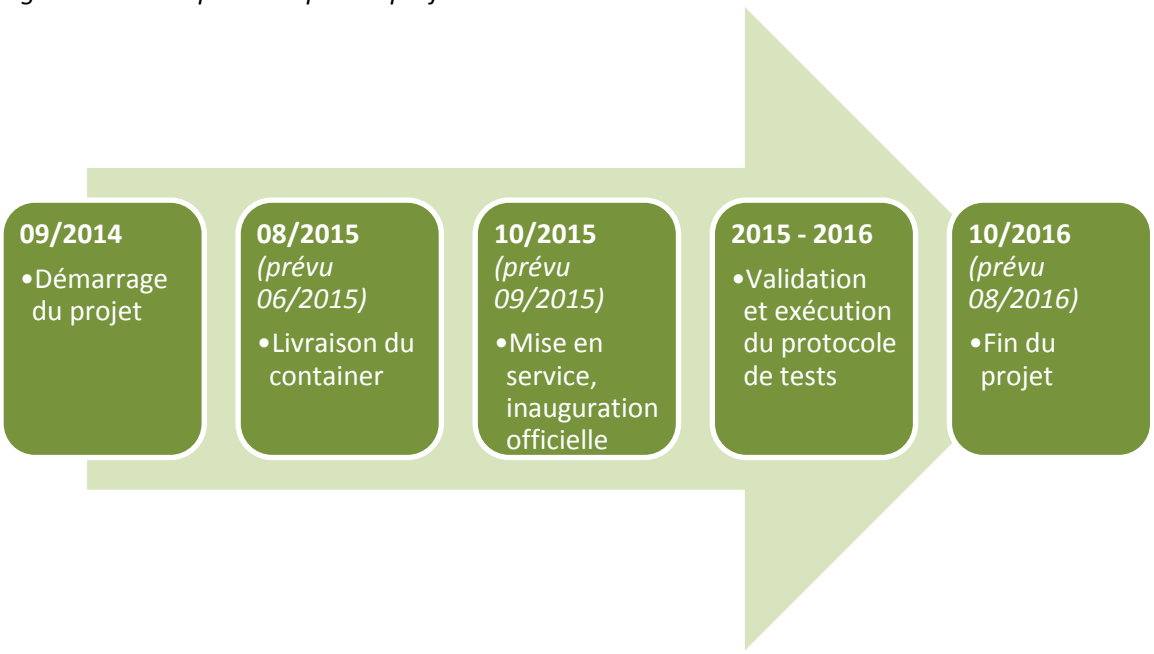
Suivi des délais

Dans l'ensemble, les échéances prévues ont été bien respectées. Il n'y a pas eu d'écarts importants par rapport au planning initial qui prévoyait un déroulement de ce projet sur 23 mois à partir du lancement.

Le projet n'a pas rencontré d'obstacle particulier. Une grande transparence des porteurs de projet et une communication fréquente et ouverte entre eux et la DIREN ont permis de réaliser ce projet dans de très bonnes conditions.

Les étapes clés du projet ont été les suivantes :

Figure 13 : Principales étapes du projet EPFL – Leclanché



Question 2.3 **En cas d'écart constaté en cours de projet, les mesures prises ont-elles permis de remédier aux problèmes ?**

Il y a eu peu de problèmes ; les écarts constatés, souvent faibles, ont été correctement traités.

Après examen des rapports semestriels et financiers et en cas de déviations constatées (légers retards, modifications de budget), la DIREN a systématiquement demandé des compléments d'informations lorsque cela était nécessaire.

Question 2.4 **Des contrôles ont-ils été effectués pour s'assurer que les résultats atteints correspondent aux objectifs fixés ?**

Le rapport final détaille les résultats en fonction des objectifs opérationnels définis.

L'impact sur l'économie locale a été apprécié au travers des emplois et des start-ups créés, ainsi que des débouchés et autres avantages pour les différentes parties prenantes.

La première version du rapport final a fait l'objet d'une analyse par un groupe de suivi interne de la DIREN ; des compléments d'information ont été demandés à l'EPFL pour connaître l'ensemble des résultats atteints, notamment en ce qui concerne les retombées positives pour les différentes parties prenantes ainsi que les perspectives et futures étapes de développement. La version finale du rapport contient davantage d'informations sur les impacts économiques, les impacts sur l'environnement, les enseignements pour les partenaires du projet, ainsi que les perspectives et futures étapes de développement/commercialisation.

Comme le prévoit le modèle de rapport final établi par la DIREN, le rapport final de l'EPFL contient les éléments suivants :

- Vue d'ensemble du projet : durée, descriptif succinct, produit ou résultat final obtenu, partenaires industriels.
- Coûts du projet : distinction de la subvention et de la participation de chacune des parties prenantes, utilisation de la subvention (frais de la Haute Ecole, montants reversés par l'EPFL à Leclanché).
- Evaluation des retombées du projet pour le Canton de Vaud et l'EPFL : investissements induits par le projet dans le canton (non financés par celui-ci), création de places de travail, engagement de personnel et création de start-ups vaudoises; estimation des avantages pour l'EPFL ainsi que pour les partenaires du projet ; mention des brevets ou licences éventuels ; description des produits commercialisables et des mesures de communications pour promouvoir le projet.
- Rappel du but du projet tel que décrit dans le descriptif de projet.
- Concept – description de l'installation ; design du système, caractéristiques de la batterie, différents tests effectués, applications développées autour du concept du « *dispatchable feeder* ».
- Résultats obtenus lors d'expérimentations dans différents cas de figure, illustrés par des diagrammes comparant le *dispatch plan*, la *prosumption* réelle et le soutirage réel (cf. glossaire).
- Discussion/évaluation des résultats/enseignements : description des points positifs ressortant du projet et ceux pouvant être encore améliorés, avec des pistes sur la poursuite des recherches par l'EPFL ; mention des enseignements tirés par Leclanché et par Romande Energie de ce démonstrateur grandeur nature.
- Point de situation au niveau cantonal sur la collaboration de l'EPFL avec les partenaires du projet, ainsi que sa collaboration au niveau national et international avec d'autres projets de recherche dans le même domaine.
- Perspectives et étapes ultérieures dans les cinq ans à venir.

Le rapport final vient clôturer le projet en résumant de manière claire les résultats obtenus, les progrès possibles et les impacts sur l'économie et les partenaires du projet. Il a été validé par la DIREN en mars 2017 et, sur cette base, le projet a été clôturé et la dernière tranche de subvention a été versée.

3.2. LA CONTRIBUTION AU DÉVELOPPEMENT DES ÉNERGIES RENOUVELABLES

3.2.1. L'AMÉLIORATION DE LA TECHNOLOGIE

Question 3.1 **Le projet a-t-il permis d'améliorer la technologie disponible ?**

Ce projet ne portait pas sur le développement d'une technique nouvelle (la batterie utilisée pour le stockage existait déjà), mais sur l'étude du comportement de cette batterie dans un réseau électrique et sur le développement de son utilisation au travers de logiciels permettant de piloter le stockage de l'énergie renouvelable sujette à des variations rapides et importantes.

Les résultats attendus ont été obtenus. Au niveau des connaissances, beaucoup de savoirs et de savoir-faire nouveaux ont été créés grâce à ce projet, dont une bonne partie publique. Un brevet a pu être déposé.

Les piles lithium-ion titanate utilisées dans le démonstrateur permettent un grand nombre de cycles charge-décharge et sont donc performantes pour le réglage fin du réseau soumis à des variations spontanées de demande et de production (solaire, éolien). Le principe développé dans ce projet est de transformer la batterie soit en élément consommateur (stockage), soit en producteur (déstockage), soit en acteur neutre.

Dans ce projet, il est question presque exclusivement de l'usage dans le système de distribution électrique d'une batterie déjà existante et son intégration. Il a consisté d'une part à développer des algorithmes qui optimisent les systèmes de stockage et d'autre part à démontrer, en grandeur réelle, l'opérationnalité d'un tel système (qualité du fonctionnement en usage).

Il n'y a pas eu à proprement parler de recherche sur la technologie de stockage en tant qu'objet à améliorer. Toutefois, le démonstrateur permet d'étudier le comportement de la batterie dans une configuration particulière où elle fonctionne comme élément de régulation du réseau (charge/décharge), notamment pour observer le nombre de cycles et l'effet sur le vieillissement des cellules.

Ce projet a abouti à la construction d'un système pilote qui fonctionne et sert de base tant à la recherche qu'à la démonstration de la maîtrise du stockage et de sa conduite pour la sécurité des lignes de distribution électrique. Les tests prévus dans le cadre du projet ont été effectués (sauf le fonctionnement en mode îlotage qui est subordonné à la mise à jour de certains équipements du réseau de l'EPFL) et ont confirmé le bon fonctionnement du dispositif. Le démonstrateur a donc permis de démontrer les performances du système.

Romande Energie a pu acquérir une excellente maîtrise de la technique du stockage dans la problématique de la sécurité du réseau. Elle bénéficie de cette technologie en tant qu'utilisatrice potentielle de l'usage développé de cette technologie. En effet, elle est en charge de la distribution d'électricité et doit à la fois garantir la sécurité d'approvisionnement (quantité et qualité du courant) tout en intégrant une grande quantité de ressources énergétiques spontanément variables.

3.2.2. LA CONTRIBUTION DE CETTE TECHNOLOGIE AU DÉVELOPPEMENT DES ÉNERGIES RENOUVELABLES

Question 3.2 **La technologie développée dans le cadre du projet contribue-t-elle aux objectifs de développement des énergies renouvelables ?**

L'usage du stockage proposé dans ce projet permet de réguler le réseau électrique face à des variations « rapides » (plusieurs fois par jour). Ceci favorise l'usage des énergies renouvelables spontanément variables comme l'électricité de source éolienne ou solaire et contribue aux objectifs de développement de ces énergies.

La technologie développée dans le cadre du projet peut contribuer à assurer la stabilité du réseau alors que la proportion des énergies renouvelables augmente dans le mix énergétique.

Par contre, comme il ne s'agit pas de stockage saisonnier, il n'a aucun effet sur la valorisation de surplus estivaux en mauvaise saison.

Les objectifs de la politique énergétique cantonale s'expriment notamment au travers du programme de législature et de l'Agenda 21. Ils visent l'augmentation de la part d'énergie renouvelable dans la consommation finale d'énergie de 6.1% en 2004 à 7.5% en 2012 puis 10% en 2020 et 20% à l'horizon 2050, afin de réduire la dépendance aux énergies fossiles (mazout et gaz). Ces dernières ont l'avantage d'être facilement stockables (cuves ou cavernes) et peuvent alimenter des usines de production d'électricité (centrales thermiques fossiles) selon les besoins du réseau électrique.

La production d'électricité de source renouvelable (solaire ou éolienne) est spontanément variable et partiellement prédictible grâce à des modèles météorologiques. La production photovoltaïque dépend de l'ensoleillement, elle est donc très fluctuante du fait de trois facteurs :

- alternance jour-nuit,
- saisonnalité : la production mensuelle varie dans un rapport de un à six entre l'hiver et l'été,
- variations de la nébulosité : la variabilité horaire ou quotidienne est très élevée, le passage d'un nuage très opaque peut, en quelques secondes, provoquer une chute brutale de la production électrique.

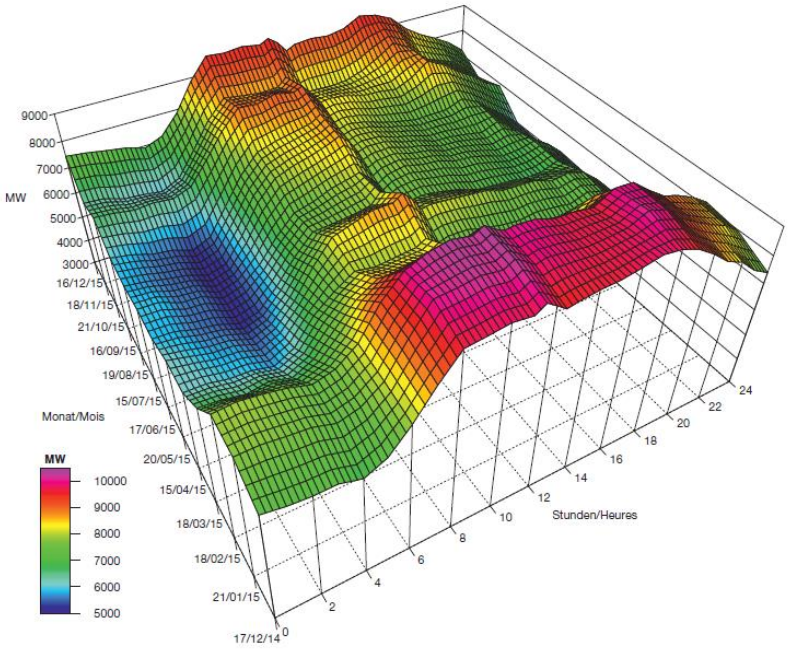
Par ailleurs, la consommation électrique varie elle aussi fortement, en fonction de la période de l'année et de l'heure du jour, comme cela est représenté par la Figure 14 ci-dessous.

Afin de garantir la stabilité de l'approvisionnement, il est essentiel que la production d'énergie électrique soit à tout moment exactement égale à sa consommation. Dans le pire des cas, de fortes variations peuvent causer une panne de courant à grande échelle. L'augmentation des énergies renouvelables dans le mix énergétique rend cet équilibre plus difficile à atteindre, car ces énergies connaissent de fortes variations imprévues, à court terme.

Garantir l'équilibre entre l'offre et la demande sur le réseau électrique constitue donc un défi de plus en plus important. C'est pourquoi le recours à des solutions d'équilibrage est nécessaire

comme par exemple des solutions de stockage sous forme d'énergie chimique (grâce à des batteries comme celle développée dans ce projet) ou d'énergie potentielle (centrales de pompage/turbinage).

Figure 14 : Charges horaire et mensuelle des centrales électriques suisses en 2015



Source : *OFEN, Statistique suisse de l'électricité 2015*

Le rapport final du projet indique que le concept s'appuie sur deux étapes successives :

- La première consiste à définir un plan de soutirage[21], appelé *dispatch plan*, pour les prochaines 24 heures (jour d'après), par tranches de 5 minutes, en fonction de la prévision de la production/consommation, appelé *prosumption*[22] des bâtiments et de la disponibilité de la batterie.
- La deuxième consiste à observer en temps réel (jour d'après) aussi scrupuleusement que possible le plan de soutirage prédéfini en contrôlant l'injection de la batterie.

Ces deux tâches sont réalisées en tenant compte de la nature aléatoire de la *prosumption* et des limites physiques de la batterie, tout en maximisant la flexibilité de cette dernière. Les applications auxquelles ce concept a été adapté sont l'écrêtage et le nivellement du soutirage. Les contraintes considérées sont :

- Le maintien adéquat du niveau de charge de la batterie garantissant la flexibilité nécessaire durant toute la période d'exploitation pour compenser l'écart entre le *dispatch plan* et la *prosumption* actuelle.

[21] Le soutirage électrique correspond à la quantité d'énergie produite distribuée depuis le réseau électrique (source : https://www.swissgrid.ch/swissgrid/fr/home/reliability/grid_stability.html consulté le 08.06.2017).

[22] La *prosumption* est déterminée selon une méthode d'auto-régression. Au préalable, une base de données statistique est élaborée. Elle contient les profils journaliers de *prosumption* pour un certain nombre d'années passées. De cette base, on sélectionne un ensemble de profils qui s'approcheraient au mieux de celui du jour visé ; les critères de sélection étant: type de jour (semaine/weekend/férié), jour de l'année (effet saisonnier), radiation solaire, etc. Le profil ^L est déterminé en effectuant pour chaque intervalle de 5mn une moyenne des valeurs fournies par les profils retenus.

- Le respect des limites techniques : état de charge, injection de la batterie, etc.
- La prise en compte de l'incertitude liée à la prévision (scénarios extrêmes).

En conclusion, le dispositif mis en place obtient de bons résultats. Ce module permet de faire des prévisions de production et d'adapter le comportement (stockage/déstockage/neutre) de la batterie et participe à la résolution d'une partie des problèmes liés à la production fluctuante d'électricité solaire (ou éolienne). Cette technologie peut contribuer à assurer la stabilité du réseau alors que la proportion des énergies renouvelables augmentera dans le mix électrique.

3.2.3. LES PRODUITS COMMERCIALISABLES

Question 3.3 **Le projet donne-t-il lieu à des produits commercialisables ?**

Le démonstrateur développé sur le site de l'EPFL fonctionne dans des conditions réelles. Il s'avère être est un excellent outil. Il reçoit régulièrement la visite de clients potentiels. L'EPFL, les start-ups et Leclanché sont en contact étroit pour la commercialisation de ce système et développent également leur réseau individuellement.

Découlant de ce projet, plusieurs installations importantes ont déjà été réalisées ou sont en cours, aussi bien en Suisse qu'à l'étranger.

Batteries

Avant le démarrage du projet, les diverses technologies de stockage d'énergie avaient des degrés de maturité plus ou moins avancés. La batterie litium-ion stationnaire était proche du lancement sur le marché. La batterie construite dans le cadre de ce projet est totalement fonctionnelle. Selon Leclanché, l'installation du container de démonstration lui a donné beaucoup de crédibilité pour approcher ses marchés et a facilité l'acquisition de clients. Depuis 2014, le projet de l'EPFL a contribué au développement de la gamme de produits de Leclanché ; aujourd'hui, cette entreprise propose toutes les tailles de batteries de quelques kWh jusqu'à des dizaines de MWh. Elle est également capable de financer et de développer des systèmes de A à Z : installation de batteries dans des containers ou des bâtiments, connexion au réseau électrique, développement des interfaces et des protections, management de l'énergie.

Logiciels

Grâce à ce projet, deux start-ups ont été lancées par des membres de l'équipe de recherche de l'EPFL. La première a pour but principal de poursuivre le développement du logiciel de gestion optimal du système de stockage électrochimique. La deuxième cherche à améliorer et commercialiser un système de surveillance et d'automatisation du réseau électrique qui permettra aux entreprises d'électricité d'exploiter leurs réseaux de manière plus fiable, efficace et rentable dans des conditions normales et d'urgence.

Valorisation du système dans le réseau électrique

Pour Romande Energie, cette expérience a mis en évidence les problèmes pratiques d'un déploiement de ce type d'installations dans le domaine public ainsi que son intégration dans

l'urbanisme ou la protection de l'environnement. Les moyens de stockage local, y compris les batteries de réseaux (batteries de services) de distribution moyenne tension telles que celles testées dans ce projet, ne font pour l'heure pas partie des éléments de coûts imputables aux coûts du réseau. Par conséquent, les mécanismes de rétribution qui rendraient de tels investissements rentables doivent encore être élaborés.

La part de flexibilité de réseau nécessaire à la gestion de l'approvisionnement énergétique ne fait pas partie des activités de GRD. Romande Energie étudie comment la part de flexibilité de réseau nécessaire à la gestion quotidienne des congestions de lignes pourrait être acquise par le GRD auprès des exploitants de batteries de services. Il s'agira de prévoir un deuxième système de rétribution entre le fournisseur d'énergie et l'exploitant de batteries. Ces deux types de mécanismes devront être coordonnés puisqu'ils mettent en œuvre la même réserve de flexibilité.

Question 3.4 **Le logiciel et le container développés dans le cadre du projet Leclanché permettent-ils le stockage de l'électricité à un coût « concurrentiel » ?**

Ce projet devait parvenir à un système industrialisable à des coûts concurrentiels par rapport à d'autres solutions sur le marché. Dans l'immédiat, la question de l'intégration du coût de ce type d'installation dans le prix de l'électricité n'est toutefois pas résolue.

Les mécanismes de rétribution qui lui permettraient d'être rentable ne sont pas encore élaborés. La répartition des coûts de cette capacité de stockage devrait être négociée au cas par cas entre le producteur et le GRD.

Une réponse fiable à la question 3.4 ci-dessus ne pourra être donnée qu'avec un recul un peu plus grand :

- en effet, il est très difficile de séparer l'aspect de sûreté du réseau et celui d'intégration optimale du renouvelable. Le système de stockage proposé peut être considéré comme du « service-système » (cf. glossaire).
- ces coûts de stockage sont liés à ce que l'on appelle les « blind costs » (coûts cachés) et la question de qui les prend en charge n'est pas résolue. Avec leur développement, les énergies renouvelables spontanément variables vont devoir intégrer tout ou partie de ces coûts. La couverture de ces derniers représente un défi dans la production des énergies renouvelables.

3.2.4. LES IMPACTS ENVIRONNEMENTAUX

Question 3.5 **Les impacts environnementaux empêchent-ils le développement de cette technologie ?**

L'absence d'une évaluation de la durabilité, notamment sous forme d'une analyse du cycle de vie, ne permet pas de se prononcer sur cette question pourtant cruciale. Dans le rapport final figurent uniquement des indications sur l'énergie grise de la batterie intégrée dans le container de l'EPFL, fondées sur des informations disponibles en ligne. Selon ce rapport,

une étude plus approfondie devrait être lancée à terme. L'une des difficultés majeures rencontrée pour évaluer les impacts environnementaux du projet est de déterminer le périmètre de l'analyse (batterie, réseau de l'EPFL, panneaux solaires, etc.).

Evaluation de la durabilité, notamment au moyen d'une analyse du cycle de vie

Le seul point « gris » de ce projet est l'absence d'une analyse du cycle de vie (ACV) tant de la technologie développée dans le cadre du projet que de la batterie utilisée ; une telle analyse n'était pas prévue dans le descriptif de projet. Une démarche d'évaluation quantitative de la technologie (par exemple, bilan énergie grise/ énergie valorisée) est complexe à réaliser :

- Un des objectifs du projet étant de conserver une grande sécurité d'approvisionnement (et pas principalement de stocker de l'énergie électrique), il faut tenir compte de cette fonction indispensable. Par exemple, pour effectuer la comparaison avec d'autres moyens de stockage de l'énergie n'assurant pas ce service de sécurité, il faut y intégrer d'autres systèmes permettant de rendre le même service.
- Par conséquent, la quantité supplémentaire d'électricité renouvelable valorisée grâce à ce stockage (un autre objectif majeur du projet) n'est pas le seul point à considérer.
- L'usage des batteries va très certainement être fortement tributaire des caractéristiques du réseau sur lequel il est implanté et des moyens de stockage traditionnels (énergie hydraulique des barrages).

L'échelle du projet EPFL - Leclanché ne constitue pas la granulométrie adéquate pour chiffrer cette problématique qui s'inscrit dans un système immense, complexe et interconnecté, par ailleurs en évolution rapide. En revanche, pour ce qui concerne le calcul de l'énergie grise de la batterie, il peut et doit être effectué. Le rapport final mentionne d'ailleurs qu'une étude devrait être lancée à terme.

Les impacts négatifs occasionnés par cette batterie sont à mettre en parallèle avec les impacts positifs découlant du système de gestion développé : alors que les algorithmes développés permettent d'intégrer davantage d'énergie issue de sources renouvelables dans le réseau tout en garantissant sa sécurité, il s'agit également de vérifier si la batterie utilisée est elle-même suffisamment « éco-compatible ».

En se limitant à l'analyse de la partie « physique » de ce projet, il ressort que la batterie utilisée est essentiellement composée de métal (environ 2/3 aluminium et 1/3 cuivre). En fin de vie, le container pourra être démonté, les modules de la batterie et les appareils électroniques désassemblés et les différents composants triés et récupérés. En ce qui concerne les autres éléments en parties plus infimes (céramique, électrolyte, titane et lithium), Leclanché estime qu'ils devraient également pouvoir être récupérés compte tenu de l'évolution rapide des technologies de récupération. Leclanché indique une durée de vie de la batterie d'environ 20 ans. Selon les calculs de l'EPFL, en fonction de l'utilisation prévue de la batterie comme élément consommateur/producteur, celle-ci pourrait atteindre une durée de vie théorique de 72 ans. Par conséquent, le fait d'utiliser la batterie comme élément de régulation pour le stockage/déstockage n'augmenterait pas la vitesse de son vieillissement.

Les attentes de la société envers les nouvelles technologies requièrent de plus en plus souvent une justification en termes d'impacts environnementaux. Les résultats potentiellement positifs

d'une ACV peuvent permettre d'augmenter l'acceptabilité sociale des nouvelles technologies. A titre d'exemple, pour un autre projet de recherche, le PNR 70 du Fonds national suisse sur le Virage énergétique[23], mis au concours en juillet 2013, les requérants étaient tenus de faire une évaluation de la durabilité sous forme d'ACV (cf. annexe III).

3.3. LE SOUTIEN DU TISSU ÉCONOMIQUE VAUDOIS

Question 4.1 **L'effet multiplicateur économique est-il conforme aux prévisions ?**

L'effet multiplicateur (rapport entre le coût total du projet et la subvention) s'est élevé à 183%. Il est très proche de celui calculé sur la base du budget de 177%.

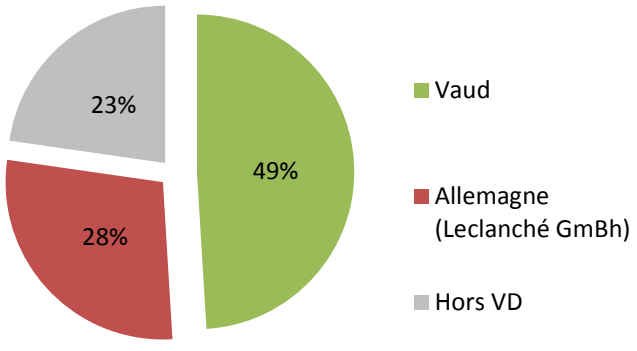
Au niveau du développement économique local, ce projet s'avère très positif pour les trois acteurs et pour le Canton de Vaud : création de deux start-ups liées à l'EPFL, ouverture de marché pour Leclanché qui se traduit par des embauches et la mise en place d'une ligne de production à Yverdon-les-Bains. Pour Romande Energie, ce projet est un pas vers la maîtrise du stockage de l'électricité comme technique de sécurisation du réseau dans le futur.

Ce projet a connu un grand rayonnement international, ce qui est très favorable pour tous les partenaires impliqués et pour le Canton de Vaud comme acteur important de l'innovation.

DÉPENSES LIÉES AU PROJET

Sur la base des rapports financiers semestriels, la Cour a identifié la localisation des différents fournisseurs et agrégé les dépenses réelles afin de déterminer la part ayant été dépensée auprès d'entreprises sises dans le canton de Vaud (cf. Figure 15 ci-dessous).

Figure 15 : Répartition des dépenses du projet EPFL – Leclanché



Source : *Cour des comptes sur la base des rapports financiers EPFL – Leclanché*

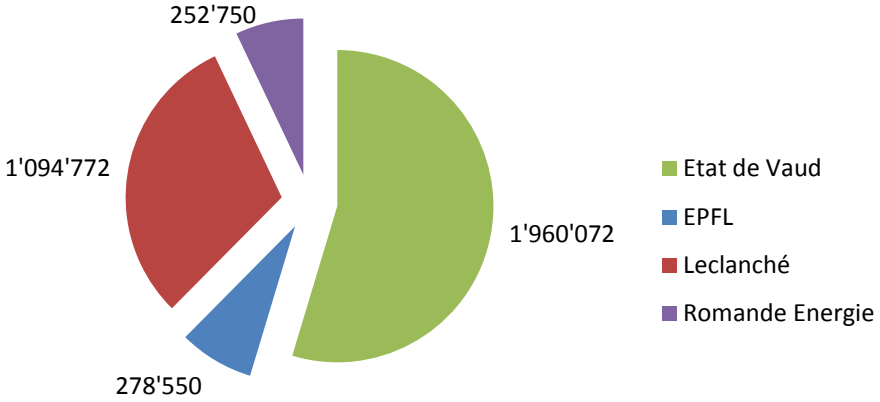
[23] Le PNR 70, doté d'un budget de CHF 37 mios, traite essentiellement des aspects technico-scientifiques du virage énergétique et de la mise en place d'un nouveau système adapté au contexte politique, social et économique de la Suisse. Dans le cadre du PNR 70, 84 projets individuels et conjoints ont été sélectionnés. (source : brochure « La recherche au service du virage énergétique », avril 2015, Fonds national suisse, Berne.

Il ressort de cette analyse qu'environ la moitié des coûts du projet est constituée de montants dépensés dans le canton de Vaud : il s'agit principalement des salaires des collaborateurs de l'EPFL, de Leclanché et de Romande Energie actifs dans ce projet.

La batterie représente environ un quart des dépenses totales. Elle a été produite par Leclanché en Allemagne car la capacité de production n'existait pas encore en Suisse à l'époque. Toutefois, la direction opérationnelle de l'entreprise étant basée dans le canton, le savoir-faire et l'ingénierie ont été développés dans le canton de Vaud.

Le rapport entre le coût total du projet et la subvention de l'Etat est de 183% (effet multiplicateur), ce qui est très proche des 177% calculés sur base du budget. Les coûts pris en charge par chacun des participants au projet sont représentés dans la Figure 16 ci-dessous.

Figure 16 : Sources de financement du projet EPFL – Leclanché



Source : *Cour des comptes sur la base du rapport final EPFL – Leclanché*

CRÉATION D'EMPLOIS

Leclanché indique avoir engagé plus de vingt personnes à Yverdon-les-Bains durant le projet, dont au moins huit pour le département batteries stationnaires, directement liées au développement des activités de ce marché.

Un candidat doctorant de l'EPFL travaillant sur le projet a été financé par Romande Energie pendant quatre ans.

En automne 2016 et au printemps 2017[24], deux start-ups ont été créées par des membres de l'équipe de recherche de l'EPFL. Sans évidemment pouvoir se prononcer sur l'avenir de ces entreprises, les compétences et l'engagement des jeunes scientifiques sont à relever. Si ces entreprises se développent, cela pourrait donner lieu à la création d'autres emplois dans les années à venir.

[24] Dates de leur inscription au Registre du commerce

GÉNÉRATION D'AFFAIRES

EPFL

Les résultats de ce projet s'intègrent dans la plateforme « Smartgrid » faisant l'objet de l'une des lignes de recherche de l'EPFL. Le démonstrateur développé au cours de ce projet s'inscrit dans le cadre des applications liées à la gestion du réseau. Il contribue de manière significative à la définition des activités de recherche menées par des doctorants et/ou des étudiants effectuant leur travail de master. De plus, son caractère unique à l'échelle européenne a abouti à l'élaboration d'une proposition d'un projet de recherche que l'EPFL a prévu de soumettre à la Commission Européenne.

Les activités de recherche liées à ce projet ont participé au rayonnement de l'EPFL. Elles ont été présentées dans le cadre de conférences et séminaires au niveau national et international par les chercheurs de la Haute Ecole. De nombreux articles ont été publiés dans des journaux scientifiques renommés.

Leclanché SA

L'impact sur Leclanché peut être qualifié de très positif, principalement grâce au démonstrateur qui jouit d'une renommée internationale. Il ressort du rapport final du projet qu'il a apporté à l'entreprise les avantages suivants :

- La démonstration de sa capacité à pouvoir fournir un système de batterie de taille importante et de qualité dans des délais raisonnables.
- Le produit en question est un excellent outil donnant beaucoup de réalité aux activités de l'entreprise.
- Les essais et les rapports de l'EPFL démontrent les performances de ce système.
- Des systèmes de stockage similaires ont été installés tels que Graciosa au Portugal (3.2 MWh), eFerry au Danemark (4.2 MWh) et ceux au Canada (53 MWh, soit plus de 100 fois la capacité du container de l'EPFL).

Fin 2016, Leclanché a installé une ligne de production de modules de batteries à Yverdon-les-Bains. Selon l'entreprise, cela représente plus de CHF 1.5 million investis dans le canton de Vaud spécifiquement pour cette installation.

En plus de la signature de plusieurs contrats concernant la vente de systèmes de stockage par batteries lithium-ion titanate, Leclanché annonce que d'autres marchés s'ouvrent, tel que le réseau de transport virtuel (stockage en amont d'une portion de ligne de transport saturée et déstockage ultérieur en aval du même tronçon).

Romande Energie

Pour Romande Energie, en tant que GRD, ce projet a permis notamment de :

- Vérifier les principes d'exploitation des lignes de distribution moyenne tension (MT) en présence de systèmes de batteries de stockage d'énergie dont la puissance et la capacité sont de l'ordre de grandeur des puissances et consommations de ces mêmes lignes.

- Démontrer pratiquement que les grandes batteries de réseau MT sont le moyen le plus rapide d'obtenir la flexibilisation de la charge et donc la maîtrise des profils de charge quotidiens ; ceci permet une pénétration maximale des énergies renouvelables et une limitation des besoins en renforcement du réseau tout en éliminant les risques de congestion.
- Contribuer à la diminution des pertes en favorisant la consommation sur place de la production locale.
- Soutenir la qualité de fourniture en tension et fréquence face aux importantes variations de puissance injectée dues aux paramètres météorologiques (soleil, vent, froid).
- Pouvoir à l'avenir prévoir les conditions d'îlotage des micro-réseaux.
- Pouvoir élaborer les mécanismes de rétribution de services au réseau.

Dans le prolongement de ce projet, Romande Energie souhaite développer son savoir-faire en matière d'îlotage (contrôle) des micro-réseaux sans réserve tournante (inertie). Elle estime que c'est dans ce domaine que se situe la plus forte valeur ajoutée de transfert technologique de ce projet.

AVANTAGE POUR LE CANTON DE VAUD

Tout au long du projet, la DIREN s'est assurée que la mention du soutien de l'Etat de Vaud pour le programme des 100 mios figurait dans toutes les communications : en particulier sur le container lui-même, dans les articles publiés, et dans le cadre de la conférence de presse lors de l'inauguration officielle du 26 octobre 2015 en présence de Mme la Conseillère d'Etat J. de Quattro.

Entre octobre 2015 et mai 2017, une quarantaine de visites du démonstrateur ont été organisées par Leclanché et/ou l'EPFL. Les visiteurs venus du monde entier étaient principalement des investisseurs, des clients potentiels, des scientifiques, des représentants politiques et des concurrents. Ce projet a donc connu un grand rayonnement international, ce qui est très favorable pour tous les partenaires impliqués et pour le Canton de Vaud comme acteur important de l'innovation.

4. LES RÉSULTATS DE L'AUDIT : PROJET HEIG-VD – TORPLANT

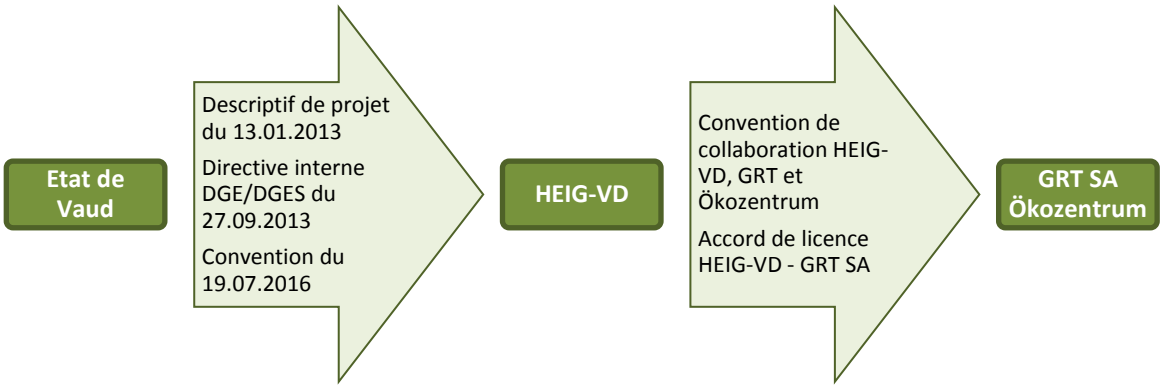
4.1. LE PILOTAGE DU PROJET

4.1.1. LE CADRE CONTRACTUEL

Le projet est défini en détail dans le descriptif de projet rédigé par la HEIG-VD, valant demande de financement. Lors du lancement des projets de recherche subventionnés, la Haute Ecole et la DGE étaient toutes deux intégrées dans le budget de l'Administration cantonale vaudoise. La HEIG-VD ne pouvait par conséquent pas percevoir de subventions cantonales. Le financement a donc initialement pris la forme d'un « crédit supplémentaire entièrement compensé ». Une « directive interne », cosignée par la directrice générale de la DGES et le directeur général de la DGE, règle les procédures et contrôles relatifs aux projets financés, qui sont fondamentalement les mêmes que ceux décrits dans les conventions de subventionnements.

Une convention entre la HEIG-VD, devenue autonome[25], et l'Etat de Vaud a été signée en juillet 2016 avec effet rétroactif au 1er janvier 2015, en remplacement de la directive interne signée initialement.

Figure 17 : Cadre contractuel du projet HEIG-VD – Torplant



Les relations contractuelles avec les divers partenaires et fournisseurs sont gérées directement par la Haute Ecole. Les flux financiers suivent la même logique : l'Etat de Vaud verse les montants à la HEIG-VD, qui transfère à GRT SA et Ökozentrum les montants leur revenant.

La convention de collaboration entre la HEIG-VD, GRT SA et Ökozentrum comprend un article réglant les questions de propriété intellectuelle. La propriété des résultats du projet Torplant financé par l'Etat de Vaud appartient par défaut exclusivement à la HEIG-VD, indépendamment de la partie qui réalisera ou qui obtiendra ces résultats. Dans tous les cas, le transfert de droits de propriété intellectuelle des résultats (transferts de brevets, licences, vente de

[25] Etablissement autonome de droit public doté de la personnalité morale

démonstrateurs, de savoir et de technologies, etc.) est soumis à l'accord préalable de l'Etat de Vaud.

Un accord de licence, signé entre la HEIG-VD et GRT SA en juin 2016, précise quels résultats appartiennent à l'école et à GRT SA, et accorde l'exclusivité d'exploitation à cette dernière durant une période donnée en échange de royalties pour la Haute Ecole.

4.1.2. LES OBJECTIFS

Question 5.1 **Les objectifs du projet étaient-ils formulés de manière satisfaisante ?**

Question 5.2 **Le descriptif de projet était-il suffisamment détaillé pour permettre à la DIREN de juger des résultats attendus ?**

Globalement, le descriptif de projet contenait les informations nécessaires : les objectifs opérationnels et les résultats attendus du projet sont énoncés de manière détaillée, avec un calendrier et des jalons, fournissant les bases nécessaires à la DIREN pour effectuer un suivi précis du projet. Les principaux impacts sur l'environnement ont été identifiés (émissions dans l'air) et le projet a cherché à les minimiser.

Une très bonne identification des forces, faiblesses, opportunités et risques a été effectuée en amont du projet et d'ailleurs la plupart des risques et faiblesses se sont réalisés. Les difficultés de réalisation rencontrées laissent penser que les objectifs opérationnels étaient trop ambitieux, notamment en ce qui concerne la production d'électricité, la commercialisation des pellets et l'autonomie de fonctionnement du torréfacteur.

Il ne figure pas dans le descriptif de projet d'objectif chiffré de chaleur et d'électricité pouvant être produites grâce à la technologie développée.

Les informations figurant dans le descriptif de projet concernant l'impact potentiel sur l'économie locale ont été estimées en termes de création d'emploi et de génération d'affaires mais ne comportaient pas d'indicateurs précis.

1er objectif du domaine C : développement des nouvelles énergies renouvelables

Tout comme les autres projets du domaine C, le projet Torplant comportait de nombreux objectifs[26], difficiles à atteindre simultanément. Il devait produire un combustible économique, de bonne qualité, qui puisse être stocké à long terme et utilisé pour la production d'électricité et/ou de chaleur, et en même temps valoriser sur site des gaz de torréfaction pour la production d'électricité et/ou de chaleur.

En ce qui concerne la production d'énergie renouvelable attendue du torréfacteur, le descriptif de projet indique que le système devrait globalement utiliser moins d'énergie pour produire des pellets torréfiés que des pellets classiques, pour une même énergie finale livrée aux consommateurs. Toutefois, les porteurs de projet n'ont pas inclus d'estimation des entrées et sorties d'énergies permettant d'étayer cette hypothèse. Par ailleurs, le projet visait à démontrer la faisabilité technique et économique de la valorisation du Torgaz sous forme de chaleur et

[26] Développement des nouvelles énergies renouvelables, soutien à l'économie locale, projets réalisés par des Hautes Ecoles vaudoises, en stade de développement avancé ou en phase de production de prototypes pouvant générer des affaires dans les entreprises, start-ups ou spin-offs vaudoises.

d'électricité ; une estimation de cette production d'énergie aurait pu figurer dans les objectifs du projet.

Dans ce projet, les impacts environnementaux découlent principalement de la combustion de la biomasse ligneuse qui peut émettre des particules fines ayant un impact négatif sur la santé humaine. Afin de vérifier leur conformité aux normes environnementales, il était prévu d'effectuer des analyses physico-chimiques des cendres ainsi que des gaz de combustion des pellets et du Torgaz. Le descriptif de projet prévoyait que les pellets torréfiés devaient pouvoir être classés selon les normes EN pour pouvoir déterminer leur valeur économique.

2e objectif du domaine C : soutien à l'économie locale

Le torréfacteur est conçu pour répondre à un marché national et international de valorisation des résidus ligno-cellulosiques demandant un haut degré d'autonomie et des faibles coûts opérationnels. Les porteurs de projet ont estimé être en présence de nombreux clients potentiels pour valoriser des matières premières n'ayant pas de valeur commerciale aujourd'hui et dont l'élimination est parfois coûteuse : notamment des collectivités publiques, entreprises d'exploitation forestière, entreprises publiques ou privées de gestion des déchets verts urbains, entreprises productrices d'électricité à partir de biomasse.

Selon le descriptif de projet, les retombées économiques suivantes étaient prévues :

1. **Emploi** : selon les résultats, des emplois dans la première unité de production pourraient être créés.
2. **Génération d'affaires dans les entreprises** : une start-up pourrait être créée ou la technologie cédée à une entreprise existante active dans la livraison de biomasse.
3. **Avantage pour le Canton de Vaud** : valorisation intéressante économiquement de résidus de biomasse disponibles localement en grandes quantités.

Ces objectifs ne sont pas suffisamment clairs et précis pour permettre une comparaison avec les résultats obtenus.

Descriptif de projet : objectifs opérationnels, résultats attendus et risques identifiés

Le descriptif de projet contient un calendrier donnant des indications détaillées sur des livrables tangibles, avec des jalons pour les aspects techniques et commerciaux. De plus, des objectifs opérationnels sont formulés sous forme de résultats et produits finaux attendus à la fin du projet[27] qui peuvent être résumés comme suit :

1. Autonomie de fonctionnement de l'unité pilote (torréfacteur avec séchoir intégré) de capacité nominale de 100 kg/h,
2. Acceptation des pellets torréfiés par le marché,
3. Prix de revient des pellets satisfaisant,
4. Bilan économique global positif,

[27] Objectifs décrits dans le descriptif de juillet 2013 (annexe à la convention de subventionnement)

5. Technique de valorisation du gaz produit (Torgaz) pour la production de chaleur et d'électricité : système de polygénération avec couplage chaleur force (p.ex. pour utilisation dans un thermoréseau).

Torplant se focalise sur le développement technologique qui permet de transformer de la biomasse ligneuse/des déchets verts en pellets torréfiés, plus denses en énergie et plus commodes d'usage, et en même temps de produire de l'électricité.

Le descriptif de projet comporte également une analyse des nombreux risques identifiés par la HEIG-VD avant le lancement du projet :

- **Torréfacteur :**

  Il existait en Europe de la concurrence car plusieurs groupements d'entreprises avaient débuté l'engineering et/ou la construction d'unités de production industrielles de pellets améliorés par la torréfaction. La pénétration sur le marché pouvait se révéler difficile principalement pour des raisons de coût d'investissement et de maintenance.

  Des difficultés opérationnelles importantes liées à la surveillance et l'automation du torréfacteur avaient déjà été décelées pendant la phase au laboratoire. Les charges en main-d'œuvre et/ou compétences opérationnelles estimées étaient importantes et il semblait nécessaire d'avoir une installation de 500-600 kg/h pour que le système devienne rentable.

- **Produits torréfiés :**

  La concurrence des pellets de bois importés en Suisse (notamment en raison du franc fort) pouvait prétériter, à court terme, la rentabilité des produits torréfiés. De plus, les plaquettes/pellets torréfiés étaient un combustible très nouveau qui n'avait pas encore fait ses preuves sur le marché.

  La fabrication de pellets à partir de différentes sortes de biomasses torréfiées n'était pas encore maîtrisée. Les produits torréfiés pouvaient s'avérer non-conformes aux normes de qualité de pellets et aux normes environnementales, surtout lors d'utilisation de biomasses ressemblant peu à du bois.

- **Torgaz :**

  La valorisation du Torgaz à l'échelle industrielle n'était pas encore maîtrisée. Une valorisation insatisfaisante de ce gaz pouvait entraîner un manque à gagner. Le risque de ne pas pouvoir valoriser le Torgaz dans un réseau de chauffage à distance était jugé faible, alors que celui de ne pas pouvoir produire de l'électricité était considéré comme important.

Le groupe chargé de sélectionner les projets de recherche qui bénéficieraient de subventions (cf. chapitre 1.2, paragraphe « Sélection des projets ») les a évalués selon neuf critères : notamment les « chances de réussite » du produit prototype (réalisme, qualité des équipes, organisation, rigueur, délais) avaient été estimées entre 20% et 50% pour Torplant. La note 2 sur 4 avait été donnée pour le critère « nouveau produit commercial », ce qui signifiait qu'un marché existait mais que le produit nécessitait encore un développement et qu'il manquait un partenaire. Dans le descriptif de projet, la HEIG-VD affirmait que : « A la fin du projet pilote, le projet Torplant entrera en phase de commercialisation. Il n'y aura pas besoin d'investissements supplémentaires en recherche et développement. ». Or, pour le critère « autonomie de l'objectif

(ne nécessite pas d'énormes investissements pour se traduire en tangible) », la note la plus basse avait été attribuée, car le groupe estimait que seule l'idée ou le concept était démontré mais que le projet ne pourrait pas donner lieu à un produit pouvant être commercialisé avant ou dès la fin du projet. Le groupe a donc estimé que Torplant était plus risqué que ce qui ressortait du descriptif de projet. La décision de subventionner Torplant a été prise malgré des risques importants, considérant que « De par la nature même de la recherche, même appliquée, une garantie absolue ne peut être fournie quant aux résultats finaux (…) »[28].

Vu les difficultés de réalisation (cf. chapitre 4.2), on peut affirmer que les objectifs de ce projet sur trois ans étaient trop ambitieux, notamment de vouloir faire à la fois une version plus grande de l'unité pilote (passage d'une capacité de 20 à 100 kg/h) et en même temps de valoriser thermo-électriquement le Torgaz (couplage du système sécheur-torréfacteur avec le système Ökozentrum). On peut penser qu'il aurait été préférable de fixer des objectifs plus modestes, par exemple en séparant ce projet en plusieurs étapes. D'autre part, si le projet Torplant n'avait pas eu d'emblée pour objectif la production électrique (cf. chapitre 1.4, paragraphe « Nature du projet »), il aurait peut-être connu moins de problèmes.

4.1.3. LE SUIVI DU PROJET ET LE CONTRÔLE DES RÉSULTATS

Question 6.1 **Un suivi satisfaisant a-t-il été effectué afin de s'assurer que les résultats obtenus correspondent aux objectifs fixés ?**

Le projet a été suivi de manière précise, conformément à ce qui était prévu et avec une grande transparence. Le système de suivi mis en place par la DIREN, complété par le COPIL instauré par la HEIG-VD et composé d'experts des différents domaines concernés (y.c. protection de l'air, l'un des enjeux majeurs de ce projet), a permis de cadrer le projet dans le but de voir aboutir le développement du système pilote.

Toutefois, il a fallu attendre la fin du développement (plus de trois ans) et la réalisation des tests de combustion pour mesurer si les résultats obtenus grâce à cette unité pilote étaient à la hauteur des espérances.

SYSTÈME DE SUIVI MIS EN PLACE

Le même système de suivi que celui utilisé dans le cadre du projet EPFL – Leclanché a été mis en place par la DGE (cf. chapitre 3.1.3 paragraphe « Suivi prévu »).

Ce système a été complété par un Comité de Pilotage (COPIL) mis sur pied par la HEIG-VD pour suivre de manière rapprochée les travaux exécutés. Ce COPIL regroupait notamment la DGE-DIREN (le responsable du domaine « ressources énergétiques », par ailleurs référent pour les questions liées à la filière bois), la DGE-DIRNA (inspection des forêts), la DGE-ARC (protection de l'air), la DGE-GEODE (déchets) et Innovaud. Il était chargé de de valider les options prises et d'orienter l'équipe de projet par rapport aux besoins et à l'évolution du marché, éventuellement dans l'optique de la création d'une start-up.

[28] PCE 07.05.2013

SUIVI RÉALISÉ

Examen des rapports reçus

Conformément à la directive interne, puis à la convention signée en juillet 2016, la HEIG-VD a remis, tout au long du projet, à la DIREN des rapports faisant des points de situation sur l'avancement du projet. Les problèmes rencontrés, les changements opérés ainsi que l'utilisation du budget sont décrits dans ces rapports.

La structure des rapports « technique & commercialisation » ainsi que des rapports financiers est la même que pour le projet EPFL – Leclanché. La Division support (Finance) de la DGE a émis un rapport d'audit en mai 2016 sur la base du rapport financier semestriel transmis par la HEIG-VD et a effectué un contrôle des comptes finaux.

Comme prévu, d'autres rapports ont été requis ponctuellement par la DIREN pour approfondir des points particuliers, notamment business plan, rapports techniques, étude marketing.

Tableau 7 : Principaux rapports reçus par la DIREN pour le projet HEIG-VD – Torplant

Type de rapport	Prévu selon directive interne / convention	Reçu effectivement
Rapports « technique & commercialisation »	3 mois après le début du projet (07/2013) puis semestriellement	• 30.11.2013 • 30.05.2014 • 30.11.2014 • 29.05.2015 • 30.11.2015 • 31.05.2016 • 30.11.2016
Rapports financiers	Annuellement selon directive interne / semestriellement selon convention	• 30.12.2013 • 31.12.2014 • 30.09.2015 • 31.03.2016 • 30.09.2016
Comptes audités par un organe de révision externe	Selon convention, annuellement[29]	• Comptes finaux audités arrêtés au 28.02.2017
Rapport final	A la fin du projet	• 03.02.2017 : première version du rapport technique • 07.02.2017 : première version du rapport marketing / commercialisation • 01.05.2017 : version définitive, validée par la DIREN

Source : *Cour des comptes sur la base des documents reçus dans le cadre de l'audit*

Visites et avis d'experts

Des visites sur site ont eu lieu deux fois par année, au cours desquelles les porteurs de projet ont présenté à la DIREN et à ses experts les résultats atteints durant la période et les prochaines actions prévues.

[29] Pas de comptes audités séparés lorsque la Haute Ecole était encore intégrée dans le budget de l'Administration cantonale vaudoise.

Dans trois des comptes rendus de visites, des appréciations ont été données sur l'état d'avancement du projet par rapport aux aspects scientifiques, technologiques et commerciaux (cf. Tableau 8). Comme pour le projet EPFL – Leclanché, ces appréciations se révélant peu utiles, la DIREN a renoncé à les inclure dans les derniers rapports de visite.

Tableau 8 : Rapports de visites et appréciations par les experts pour le projet HEIG-VD – Torplant

Date de la visite sur site	Critères d'appréciation[30]		
	Scientifique	Technologique	Commercial
20.02.2014	-	-	-
08.10.2014	A	B	B
10.02.2015	A	B	C
06.10.2015	A	B	B
01.03.2016	-	-	-
12.10.2016	-	-	-

Sources : *Rapports de visites*

Séance du COPIL

Le COPIL s'est réuni à trois reprises (02.06.2014, 18.06.2015, 30.08.2016). A l'occasion de ces séances, la HEIG-VD a présenté aux participants des informations sur le déroulement du projet, les problèmes rencontrés et les pistes à suivre pour mener à bien le projet.

Question 6.2 Le projet de recherche a-t-il respecté le budget et les délais prévus ?

Ce projet a rencontré des obstacles techniques ; la construction de l'unité pilote a connu un retard important, ce qui n'a pas permis de réaliser tous les essais de torréfaction prévus ni d'obtenir un produit commercialisable comme cela était espéré.

Ces difficultés ont généré des coûts supplémentaires. Malgré tout, le montant de la subvention versée par le Canton de Vaud n'a pas été augmenté. Les porteurs de projet se sont efforcés de limiter les dépenses pour les équipements et infrastructures et ont pris en charge le surplus.

Plusieurs avenants ont été apportés au descriptif de projet afin de tenir compte des changements intervenus en cours de route (en janvier 2014, mai 2014 et mai 2016), notamment en termes de budget et de planification. A chacune de ces occasions, la DIREN a fait des points de situation intermédiaires avec la HEIG-VD (et ses partenaires) pour s'assurer que le projet pouvait être poursuivi, tout en respectant la volonté du Canton de ne pas augmenter le montant de la subvention. Les comparaisons ci-après sont faites par rapport au budget et planning initiaux[31].

Suivi financier

A la date de l'audit, la phase de développement du projet Torplant financée dans le cadre du programme des 100 mios est terminée. La dernière tranche de subvention a été versée le

[30] Cf. note 20, page 41
[31] Descriptif du projet Torplant, avenant n° 1 après validation par le Conseil d'Etat du 5 juin 2013.

22 août 2017, suite à la remise par la HEIG-VD du rapport final décrivant les résultats obtenus et une dernière séance de clôture du COPIL. La subvention totale versée s'élève à CHF 2'100'000.

Les observations qui suivent découlent de l'analyse des rapports financiers préparés par la HEIG-VD et les partenaires du projet, les divers échanges entre la Haute Ecole et la DIREN :

- La subvention versée par l'Etat de Vaud est conforme au montant budgété. Par contre, la contribution de la HEIG-VD s'est avérée beaucoup plus importante que prévu. De plus, GRT SA et Ökozentrum, qui étaient au départ de simples fournisseurs, sont devenus des partenaires ; ils ont consacré des ressources supplémentaires pour ce projet.

Tableau 9 : Dépenses réelles comparées au budget pour le projet HEIG-VD – Torplant

Sources de financement	Budget initial	Coûts réels	Coûts réels %	Différence
Part Etat de Vaud	2'100'000	2'100'000	70.4%	0
Contrib. HEIG-VD	156'996	424'478	14.2%	267'482
Contrib. de GRT SA	0	446'013	15.0%	446'013
Contrib. de Ökozentrum	0	11'985	0.4%	11'985
Total	**2'256'996**	**2'982'476**	**100%**	**725'480**

Sources : *Descriptif de projet et rapport final HEIG-VD – Torplant*

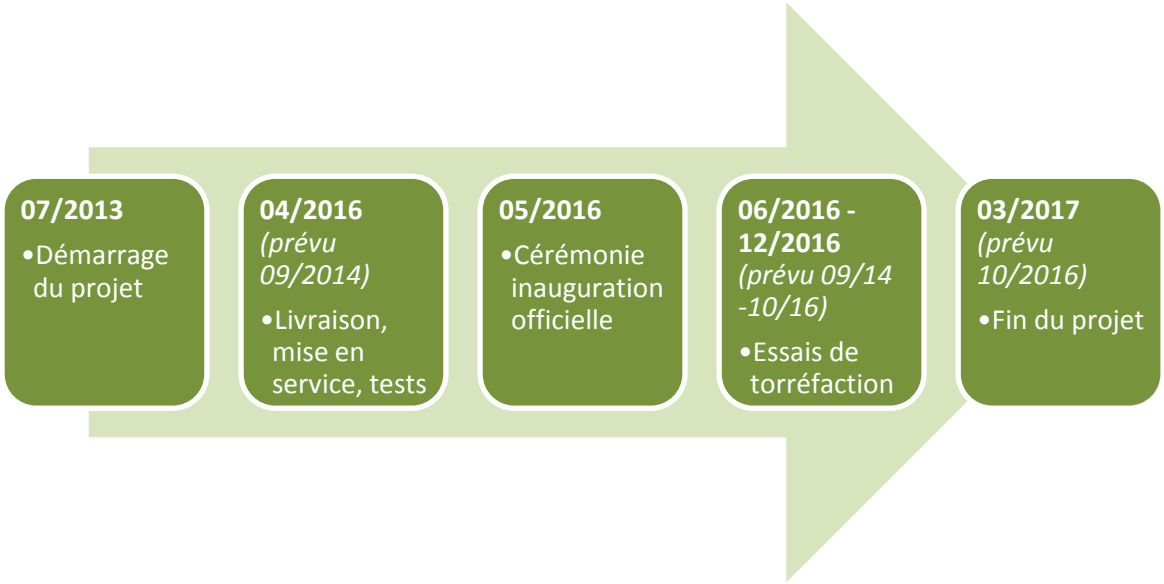
- Selon les explications figurant dans le rapport final, les dépassements de budget sont dus à un nombre d'heures beaucoup plus important que prévu consacrées par tous les participants au projet pour surmonter les obstacles rencontrés et obtenir l'unité pilote. Les collaborateurs de la HEIG-VD ont travaillé presque 7'000 heures, alors que 2'326 heures figuraient au budget, tandis que GRT SA a investi 5'700 heures et Ökozentrum 3'420 heures au lieu de respectivement 883 et 191 heures.
- Les porteurs de projet se sont montrés inventifs et économes, notamment en utilisant du matériel de récupération (p.ex. le convoyeur) pour limiter les coûts, et pouvoir mener ce projet à bien malgré les difficultés rencontrées. De ce fait, le montant des équipements et infrastructures, des consommables et des autres frais (CHF 1.014 mio) est resté légèrement en-dessous du montant figurant dans le budget initial (CHF 1.085 mio).

Suivi des délais

Le calendrier prévoyait un déroulement de ce projet sur 40 mois à partir du lancement. En réalité, le projet s'est étendu sur 5 mois supplémentaires, sans réaliser tous les tests prévus (cf. Figure 18 ci-dessous).

Le descriptif de projet prévoyait initialement une mise en service du torréfacteur en septembre 2014. Toutefois, la HEIG-VD a évalué différentes options pour la construction de l'unité pilote et, au printemps 2014, elle a pris la décision de la co-construire avec GRT SA et Ökozentrum. En novembre 2014, sur la base des délais de livraison annoncés par les fournisseurs, la Haute Ecole prévoyait que le montage du système pourrait être terminé avant fin février 2015. Or les principaux éléments ont été livrés seulement durant le premier semestre 2015. Il a ensuite fallu procéder à la construction, au montage et au câblage des équipements, puis réaliser des tests des différents éléments qui se sont terminés au printemps 2016.

Figure 18 : Principales étapes du projet HEIG-VD – Torplant



Les retards sont principalement dus à une sous-estimation de la complexité de l'interface entre le système d'Ökozentrum et Torplant et au temps nécessaire pour fabriquer les raccordements et les échangeurs de chaleur. Dans les rapports semestriels, la HEIG-VD mentionne aussi que les retards sont imputables au délai de construction du torréfacteur plus long que prévu. La préparation des plans, des modèles et des maquettes 3-D de l'installation a pris plus de temps que ce qui était planifié. La prolongation de la phase d'étude a été jugée préférable à la re-fabrication de pièces lourdes en acier qui auraient été mal étudiées.

La réalisation d'essais au laboratoire a été retardée à cause de pannes et de divers problèmes rencontrés, considérés par la HEIG-VD comme « normaux » pour une unité pilote : p.ex. réparation du convoyeur tombé en panne, émissions de gaz organique et de poussières dépassant les normes de sécurité et modification nécessaire du système d'enlèvement de poussières, nécessité de procéder à des essais de torréfaction de plusieurs types de matières premières et des essais de production de pellets.

Par ailleurs, la soumission du dossier CAMAC[32] a pris plus de temps que prévu : il a fallu fournir des explications détaillées au sujet de la production de poussières, leur contrôle et la conception de mesures de diminution de celle-ci.

En résumé, malgré les efforts considérables de tous les partenaires pour mener ce projet à terme, la Cour constate que la construction de l'unité pilote a connu un retard important, ce qui n'a pas permis de réaliser tous les essais de torréfaction prévus (pour produire 100 kg/h durant au moins 120 heures en continu) ni d'obtenir un produit commercialisable afin de conclure des contrats avec des clients potentiels comme cela était espéré.

[32] Centrale vaudoise des autorisations en matière d'autorisations de construire

Question 6.3 **En cas d'écart constaté en cours de projet, les mesures prises ont-elles permis de remédier aux problèmes ?**

Afin de ne pas perdre l'investissement et de pouvoir juger du succès du système de torréfaction développé, il était nécessaire de construire l'unité pilote pour procéder aux tests et voir si les résultats étaient conformes aux attentes. Même si peu d'actions correctrices pouvaient être prises en cours de projet, des discussions à propos des problèmes rencontrés ont toutefois eu lieu durant le projet.

Durant tout le déroulement du projet, la HEIG-VD a communiqué à la DIREN avec une grande transparence sur les problèmes rencontrés et les retards, sur ce qui fonctionnait ou pas ; les nouvelles options ont été discutées avec le COPIL. La grande disponibilité des porteurs de projet est à relever.

Sur la base des rapports semestriels, la DIREN a fréquemment demandé des compléments d'informations avant de les valider puis de verser la tranche de subvention prévue, une fois qu'elle avait la conviction que le projet continuait à se développer dans la bonne voie et avait des chances d'aboutir.

Etant donné qu'il était nécessaire d'aller jusqu'au bout du projet, c'est-à-dire de construire l'unité pilote, pour juger du succès de cette technologie et ne pas perdre l'investissement déjà consenti, il était difficile d'intervenir en cours de route. Les discussions ont surtout porté sur la résolution des problèmes rencontrés et sur la recherche de débouchés.

Question 6.4 **Des contrôles ont-ils été effectués pour s'assurer que les résultats atteints correspondent aux objectifs fixés ?**

Des contrôles adéquats ont été faits pour vérifier dans quelle mesure les résultats atteints correspondent aux objectifs opérationnels : le rapport final détaille les écarts entre les résultats obtenus et les objectifs opérationnels qui avaient été définis et explique les étapes ultérieures à entreprendre pour poursuivre le développement du torréfacteur.

Les premiers rapports « finaux » technique et marketing/commercialisation reçus en février 2017 ne comprenaient pas tous les éléments nécessaires pour que la DIREN puisse émettre un avis définitif sur les résultats obtenus et décider du versement de la dernière tranche de subvention. Par conséquent, des compléments ont été demandés à la HEIG-VD qui les a fournis dans le nouveau rapport final en mai 2017. Dans ce rapport ont été ajoutées notamment une évaluation économique des retombées pour les différents participants au projet et pour le Canton, une appréciation des améliorations possibles ainsi qu'une réflexion sur les perspectives et étapes ultérieures. Le suivi de la DIREN s'est achevé avec le versement de la dernière tranche de subvention qui suit l'acceptation de ce rapport final.

4.2. LA CONTRIBUTION AU DÉVELOPPEMENT DES ÉNERGIES RENOUVELABLES

4.2.1. L'INNOVATION DÉVELOPPÉE

Question 7.1 **Le projet a-t-il permis d'atteindre les objectifs fixés en termes d'innovation ?**

Une unité pilote (torréfacteur avec séchoir intégré) a effectivement été construite et a permis de réaliser quelques essais de torréfaction. Les résultats obtenus ne correspondent cependant pas aux objectifs, ni en termes d'autonomie de fonctionnement et de rendement de l'installation pilote, ni au niveau de la valorisation du Torgaz pour la production d'électricité, qui ne semblait d'ailleurs pas être un objectif très réaliste.

L'unité pilote a été mise en service avec plus d'une année de retard et seulement sept lots de biomasse torréfiée ont été produits entre fin août et mi-décembre 2016. Dans le rapport final, la HEIG-VD annonce qu'hormis les heures de chauffage et de refroidissement, le torréfacteur a fonctionné 211 heures et a produit 7'255 kg de plaquettes de biomasse torréfiée à partir de branchages déchiquetés et de plaquettes forestières. Les plaquettes torréfiées ont été analysées et utilisées ensuite pour des tests de combustion.

Les données obtenues et les expériences pratiques acquises pendant le projet pilote permettent d'évaluer la performance technique et l'efficacité énergétique du procédé de torréfaction et d'identifier des pistes d'optimisation. Bien que le torréfacteur pilote n'ait pas pu respecter entièrement le cahier des charges, les résultats obtenus en ce qui concerne notamment le rendement thermique du sécheur (72-75%) et du torréfacteur (92%) sont conformes aux valeurs rapportées dans la littérature et par les entreprises actives dans le domaine. Ils ont été utilisés pour comparer la torréfaction à l'échelle locale sur les plans économiques et énergétiques pour la production de pellets et/ou de briquettes.

Au terme du projet, l'autonomie de fonctionnement de l'unité pilote construite n'est pas encore atteinte. Pour des raisons de sécurité du bâtiment et de réglage, une surveillance et une intervention humaine constantes ont été nécessaires durant le fonctionnement de l'installation ; la capacité nominale atteinte du torréfacteur est seulement de 34 à 61 kg/h (avec des ressources à un taux d'humidité stable de 20%) et la durée maximum de fonctionnement en continu était de 42 heures, alors que 100 kg/h pendant au moins 120 heures de production sans interruption (avec des ressources mixtes) étaient attendus.

La technique de valorisation du Torgaz par production de chaleur et d'électricité n'est pas validée. Le couplage du torréfacteur avec le système Ökozentrum n'a pas fonctionné de manière satisfaisante. La valorisation électrique via le Torgaz semble abandonnée avec la volonté de remplacer, dans un nouveau système pilote à développer, le système Ökozentrum par un brûleur à bois d'une technologie plus simple et robuste. Si la production d'électricité via le Torgaz avait réussi, dans le meilleur des cas, cela aurait permis au maximum une autonomie électrique du système Torplant (cf. chapitre 4.2.3, question 7.5).

Il faut relever que ce projet est une étape intermédiaire, entre la première phase qui s'est terminée en 2013 et un nouveau projet CTI[33] lancé dans la foulée. Il ressort des analyses des porteurs de projet et de la DIREN que des modifications devraient être faites pour améliorer les performances du système pilote et son autonomie pour espérer arriver à un système fonctionnel et commercialisable.

4.2.2. LA CONTRIBUTION DE CETTE TECHNOLOGIE AU DÉVELOPPEMENT DES ÉNERGIES RENOUVELABLES

Question 7.2 **La technologie développée dans le cadre du projet contribuera-t-elle aux objectifs de développement des énergies renouvelables ?**

Les tests ont confirmé que la torréfaction augmente le rendement calorifique des plaquettes de bois. Toutefois, pour déterminer si le projet Torplant permet d'augmenter globalement l'énergie tirée de la biomasse ligneuse, il serait nécessaire de prendre en considération l'ensemble de la filière ainsi que la technique de valorisation de ces plaquettes ou pellets.

Le système pilote engendre des pertes thermiques importantes ainsi qu'une consommation électrique et de gaz naturel excessive. Des développements supplémentaires sont nécessaires pour optimiser le système, notamment en augmentant sa taille, pour espérer atteindre un bon rendement énergétique.

Développer ou produire plus d'énergie renouvelable ne dépend pas seulement de la technologie mais aussi des ressources entrantes et du système de valorisation de la matière torréfiée.

Davantage d'énergie renouvelable sera produite si les ressources proviennent des filières matière, mais potentiellement au détriment de ces mêmes filières (conflits d'usage possibles). Si les matières premières utilisées sont celles allant déjà en filière incinération, la production d'énergie dépendra des rendements des transformateurs en aval de la torréfaction (valorisation actuelle en cogénération dans un incinérateur en comparaison avec la valorisation future des matières torréfiées en thermique et/ou électrique).

Lors du lancement du programme des 100 mios, la « stratégie bois-énergie » du Canton de Vaud n'avait pas encore été développée. Il n'était donc pas possible d'évaluer de quelle manière ce projet s'insérait dans les filières énergies-matières de la biomasse. Il a donc démarré sans que les futures complémentarités ou la concurrence entre les ressources que ce projet pouvait générer soient prises en considération. Le problème de concurrence possible sur la ressource a été relevé par l'expert mandaté par la DIREN lors de la première visite en février 2013. Plus tard, dans son courrier d'acceptation du rapport semestriel du 31 mai 2014, la DIREN a attiré l'attention de la HEIG-VD sur l'impérative nécessité de prendre en compte la planification cantonale aussi bien dans le domaine forestier que dans celui des déchets verts. Le projet étant déjà bien avancé à ce moment-là, il n'était toutefois plus possible de formuler une telle exigence.

[33] Commission pour la technologie et l'innovation

Le projet a démontré que la technologie développée permet d'améliorer la qualité du combustible. Il ressort des tests de combustion (cf. Tableau 10 ci-dessous) que les plaquettes de bois torréfié sont de qualité supérieure aux plaquettes de bois non torréfiées, en ce qui concerne leur pouvoir calorifique et leur utilisation comme combustible.

Par contre, l'amélioration sur le stockage du combustible n'a pas été prouvée. Trop peu de données techniques sont disponibles à la fin du projet, des tests étant encore en cours en 2017.

Tableau 10 : Résumé des résultats principaux pour les six premiers essais de torréfaction

Rendement énergétique de séchage	%	75
Rendement énergétique de torréfaction	%	92
Rendement énergétique de séchage et de torréfaction	%	69
Pouvoir Calorifique Inférieur (PCI) de la matière première (m.p.)	MJ/kg	9,4 à 15,2
Pouvoir Calorifique Inférieur (PCI) de la matière torréfiée	MJ/kg	18,6 à 20,8
Rendement énergétique de la biomasse (MJ PCI produit/MJ PCI m.p.)	%	91
Augmentation de la l'énergie spécifique (PCI)	%	42
Rendement massique (masse sèche produit/masse sèche m.p.)	%	79

Source : *Annexe 1 du rapport technique final HEIG-VD – Torplant, mai 2017*

En utilisant la cogénération pour les matières torréfiées, cela permet potentiellement de produire de l'électricité. Toutefois, se pose le problème actuel du rendement économique des installations de couplage chaleur force (CCF).[34]

Le système doit encore être modifié pour espérer atteindre un bon rendement énergétique. Les porteurs de projet envisagent notamment d'apporter les améliorations suivantes dans une étape ultérieure :

- Utilisation d'un combustible d'appoint non fossile, par ex. le bois, le biogaz ou un autre biocombustible.
- Récupération de chaleur sortant de l'échangeur thermique pour préchauffer l'air de combustion.
- Récupération de chaleur à basse température pour pré-sécher la biomasse entrante.
- Moteurs de puissance adaptée au besoin avec variateurs de fréquence.

Au final, il apparaît que le système va conserver une forte tension entre des objectifs économiques (avoir des ressources à coûts nuls ou négatifs, voir question 7.4 ci-dessous) et des

[34] Pour des raisons de rentabilité économique, une grande installation CCF doit tourner de 3'000 à 5'000 heures dans l'année, soit un temps plus long que la période de chauffage. On la dimensionne généralement pour couvrir les besoins en chaleur de base des bâtiments et non pas la totalité – ce qui lui permet de tourner à un régime constant. D'autres sources de chaleur sont donc nécessaires pour couvrir les pics de demande.
Pour profiter pleinement des avantages des installations CCF, il faut donc une planification énergétique territoriale qui prenne en compte les besoins en chauffage et en électricité, tout en considérant les impacts sur l'environnement. Une vision d'ensemble est d'autant plus nécessaire que le marché propose désormais des petites installations CCF au gaz naturel/biogaz et à pellets de bois pour les petits immeubles ou les maisons individuelles: les « chaudières électrogènes » (l'électricité est produite par un mouvement mécanique ou avec des piles à combustible). Si le courant n'est pas utilisé dans le bâtiment, il peut servir à alimenter la pompe à chaleur de son voisin, ou être injecté dans le réseau selon un contrat de rachat avec la compagnie locale d'électricité, comme c'est le cas avec les panneaux solaires photovoltaïques.
Source : *https://www.energie-environnement.ch/maison/renovation-et-chauffage/installations/couplage-chaleur-force-ccf*, consulté le 23.06.2017

objectifs environnementaux (difficulté d'avoir un produit et des émissions conformes aux normes avec des déchets en entrée de torréfaction, voir question 7.6 ci-dessous).

4.2.3. LES PRODUITS COMMERCIALISABLES

Question 7.3 **Le projet donnera-t-il lieu à des produits commercialisables ?**

A l'issue du projet, l'unité pilote pose encore plusieurs problèmes ne permettant pas la commercialisation immédiate du torréfacteur (voir question 7.1). Toutefois, GRT SA entend poursuivre le développement dans le but d'aboutir à une machine commercialisable.

En ce qui concerne les plaquettes ou les pellets torréfiés, la finalisation des tests pour vérifier s'ils répondent aux normes est nécessaire pour se prononcer sur la possibilité de leur commercialisation comme combustible pour les installations de petite taille.

Pour que l'innovation soit validée, elle doit être viable économiquement : le projet a pour but l'obtention d'un système ayant un bilan économique global positif et la validation de l'acceptation par le marché des pellets torréfiés, ce qui n'a pas encore été atteint. Les objectifs de rentabilité économique fixés pour ce projet contraignent fortement les intrants (des coûts globalement nuls ou négatifs sont nécessaires) ce qui péjore la qualité du produit final.

Torréfacteur

A la fin du projet, la ligne pilote est encore « semi-industrielle ». Le passage à l'industrialisation nécessite encore plusieurs évolutions techniques (autonomie d'alimentation, système de récupération de la chaleur, système de valorisation Torgaz, …). Sa commercialisation sera difficile en l'état sans construire une troisième unité pilote, éventuellement chez un partenaire potentiel. Au moment de l'audit, les torréfacteurs qui pourraient être construits seraient encore des systèmes sur mesure, qui varieraient selon les ressources à disposition et le lieu d'implantation.

Il ressort de ces constats que la commercialisation de la technologie ne sera pas immédiate. Le partenaire GRT SA s'est beaucoup investi dans le développement de l'unité pilote ; il semble avoir l'intention de poursuivre ce travail jusqu'à l'obtention d'un système viable pour pouvoir le commercialiser à terme.

Plaquettes et pellets torréfiés

Seuls quelques tests de torréfaction ont été effectués durant le projet ; il n'y a pas encore eu de production à proprement parler de plaquettes de bois ou de pellets torréfiés. Par conséquent, l'information sur l'acceptation de ces produits par le marché n'est pas encore connue. Ceci dépendra notamment de leur prix de revient qui découle lui-même des ressources entrantes et des coûts de la pelletisation.

Une évaluation de la rentabilité a été faite par la HEIG-VD sur la base d'une unité de 500 kg/h, alors que le torréfacteur a atteint une capacité de maximum 61 kg/h durant les tests, quantité d'ailleurs inférieure aux objectifs. Une grande marge de progression existe avant l'obtention de

plaquettes ou de pellets commercialisables, aussi bien en termes de capacité du torréfacteur que de qualité des produits torréfiés.

Question 7.4 Le projet Torplant rendra-t-il le coût de production et de livraison des pellets et plaquettes torréfiés inférieur à celui des pellets standards ?

Afin de pouvoir produire les plaquettes et pellets à un coût concurrentiel, il est nécessaire d'augmenter la capacité du torréfacteur à au moins 500 kg/h.

De plus, le prix des plaquettes et pellets torréfiés est fortement dépendant des matières entrantes : si du bois de bonne qualité doit être utilisé pour respecter les normes de pollution, cela renchérit énormément les plaquettes/pellets et rend le processus non rentable en considérant les prix actuels des différents combustibles.

Par contre, si des déchets sont utilisés, à un prix négatif (ceux qui produisent ces déchets paient pour s'en débarrasser), cela devient intéressant financièrement mais risque de ne pas permettre de respecter les normes concernant les émissions.

La viabilité économique du système est un point essentiel de ce projet et les objectifs suivants ont été fixés :

- Acceptation des pellets par le marché (non assurée à ce jour, voir question précédente)
- Prix de revient des pellets satisfaisant
- Bilan économique global positif

Pour que le prix de revient des pellets soit considéré comme satisfaisant, il doit être proche du prix de marché des autres combustibles disponibles. Au moment de l'audit, le bas prix des énergies fossiles n'était pas propice au développement et à la mise sur le marché de solutions innovantes pour la bioénergie en Suisse (cf. Figure 19 ci-dessous).

Le prix des pellets de bois a subi peu de variations ces dernières années, restant entre 7 et 9 ct./kWh, selon le mode de transport et la quantité livrée. Les plaquettes, nécessitant moins de transformation ont un coût légèrement inférieur, entre 4 et 5 ct./kWh. Le prix du mazout et du gaz se situent quant à eux entre 7 et 9 ct./kWh à la fin de l'année 2016.

Les premières analyses réalisées par la HEIG-VD[35] montrent que le prix des pellets torréfiés est de 15% plus élevé que les pellets classiques, mais que l'efficacité élevée de la combustion (rendement supérieur de 3-30%) et les coûts logistiques réduits (possibilité de stocker les pellets torréfiés plus longtemps et coûts de transport de 10-65% inférieurs) pourraient compenser ces coûts supplémentaires avec une unité de torréfaction ayant une capacité de plus de 2'000 kg/h. Or, l'unité pilote est loin d'atteindre cette performance.

Dans le rapport final, les porteurs de projet ont évalué la rentabilité pour une unité commerciale d'une capacité de production de 500 kg/h fonctionnant 7'000 h/an dans différents scenarii en fonction du coût de la matière entrante et du prix de vente des plaquettes et pellets. Cette analyse montre qu'avec un coût moyen de matière première entre 7 et 18 CHF/m^3, il serait possible de vendre des pellets torréfiés à un prix proche de celui des pellets non torréfiés, tout

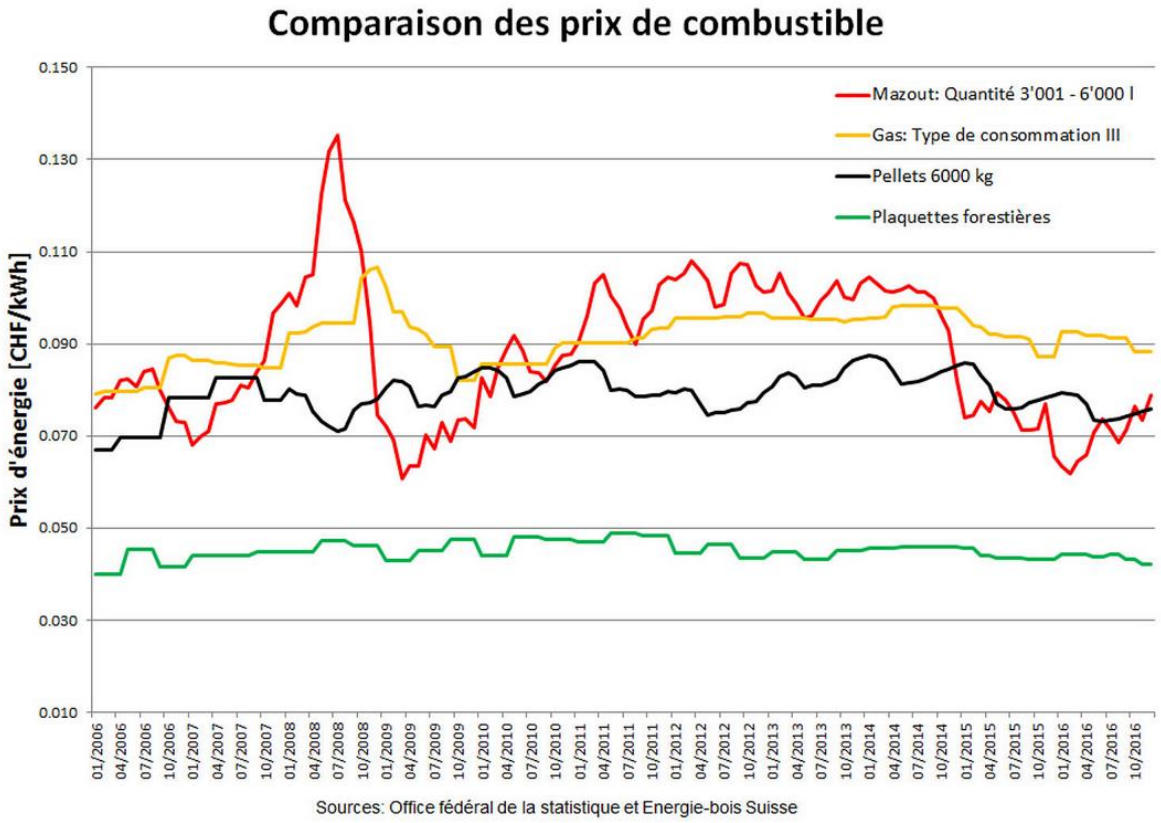
[35] Rapport sur la commercialisation de la technologie pour les pellets torréfiés, 08.10.2014

en assurant une rentabilité du système et un retour sur investissement corrects. Pour confirmer cette hypothèse, la Haute Ecole doit encore vérifier la qualité et le contenu énergétique des pellets torréfiés obtenus une fois les essais de pelletisation réalisés.

Ces études montrent que la rentabilité du système est très sensible au prix de la matière première et au prix de vente des produits. La rentabilité effective doit être définie pour chaque nouvelle installation en fonction des conditions locales. Ainsi, le modèle économique dépend fortement des paramètres économiques locaux et demande à être étudié pour chaque cas.

Il faut relever que les calculs ont été faits pour une unité de 500 kg/h, ce qui est largement supérieur à la capacité atteinte par l'unité pilote. Au stade de développement du torréfacteur atteint à la fin du projet, les plaquettes et pellets torréfiés ne peuvent donc pas encore être produits à un coût concurrentiel.

Figure 19 : Comparaison des prix de combustible 2006 – 2016



Source : *http://www.energie-bois.ch/energie-bois-a-propos/bois-energie-prix-indicatifs.html consulté le 04.07.2017*

Question 7.5 Le Torgaz sera-t-il suffisamment rentable pour être valorisé ?

Comme cela avait été pressenti avant le lancement de ce projet, la valorisation du Torgaz s'avère très difficile. La production d'électricité ne s'est pas révélée concluante. Compte tenu du prix actuel du kWh électrique, la valorisation du Torgaz n'est pas rentable. Les résultats sont encore incertains en ce qui concerne la valorisation thermique du Torgaz.

En plus de la production de plaquettes torréfiées, le projet avait pour objectif de développer une technique de valorisation du Torgaz par production de chaleur et d'électricité.

Les résultats obtenus ont conduit la HEIG-VD à conclure que le dispositif de récupération du Torgaz devait être remplacé par une technologie qui soit satisfaisante du point de vue de l'efficacité énergétique et qui soit robuste. « Ceci est indispensable en vue d'améliorer non seulement les coûts d'exploitation, mais aussi l'autonomie de l'installation, sa fiabilité, et son indépendance par rapport aux ressources d'origine fossile. Le remplacement peut être envisagé par un appareil type brûleur à bois, dans lequel pourront être également valorisées les fines qui sont récupérées dans le cyclone si celui-ci a un fonctionnement à sec. »[36]

Les résultats du projet montrent que l'utilisation du Torgaz prévue dans le démonstrateur ne permet pas de produire de l'électricité de manière rentable compte tenu du coût actuel du kWh électrique. De plus, le potentiel de production d'électricité du Torgaz est très marginal : les résultats obtenus à la fin du projet montrent qu'il permet au mieux l'autonomie électrique du système de torréfaction.

Il n'est pas encore clair à l'issue du projet si la valorisation thermique du Torgaz pourrait quant à elle être rentable.

4.2.4. LES IMPACTS ENVIRONNEMENTAUX

Question 7.6 **Les impacts environnementaux empêchent-ils le développement de cette technologie ?**

La conformité des émissions du *torréfacteur* avec l'OPAir n'a pas été atteinte durant le projet.

Les essais de *combustion des plaquettes torréfiées* effectués par la HEIG-VD montrent que les rejets dans l'air sont conformes à l'OPair. N'ayant pas encore été produits, des doutes subsistent sur la future conformité des *pellets torréfiés* par rapport aux normes à respecter pour les commercialiser, en particulier SN EN ISO 17225-2.

Le *Torgaz*, même s'il est assimilé à un combustible gazeux, semble difficilement exploitable pour la production d'électricité et de chaleur comme cela était envisagé. Les mesures permettant de garantir que sa combustion serait bien conforme à l'OPair n'ont pas été réalisées durant le projet.

Dès le début, les porteurs de projet ont identifié la problématique de qualité de l'air comme étant un point crucial du projet. Pour cette raison, le COPIL a inclus le responsable de la DGE-ARC afin de tenir compte des exigences de protection de l'air.

Torréfacteur

Diverses émissions sont produites lors du processus de torréfaction lui-même, notamment des poussières venant du convoyeur à bande et du broyeur, des vapeurs venant de la benne de biomasse ligneuse et des émissions gazeuses provenant de la cheminée.

Des analyses des émissions de la cheminée (mélange de gaz de combustion du brûleur, de l'air ajouté, de la vapeur d'eau de séchage de la matière première, des poussières et des éventuels

[36] Rapport final, volet marketing, HEIG-VD

imbrûlés) effectuées en novembre 2016 montrent des dépassements de la norme pour le CO, des imbrûlés (alcènes), et ponctuellement des NOx.

Plaquettes et pellets torréfiés

Plaquettes

Le système Torplant a produit des combustibles sous forme de plaquettes de bois ou de branchages torréfiés. Ces combustibles doivent répondre à certaines normes pour être mis sur le commerce, en particulier SN EN ISO 17225-2.

Lors de la séance du COPIL de février 2014, il était relevé que « des matières premières avec tarif de reprise (branchages) ont souvent des teneurs en métaux lourds et en souffre qui dépassent les valeurs limites pour combustibles et ont une teneur élevée en cendres (entre 2 et 5%). Le mélange avec des résidus de forêt permet de corriger les dépassements des valeurs limites. Cependant, obtenir des résidus forestiers engendre un coût supplémentaire ».

La HEIG-VD a effectué des essais de combustion dans une chaudière à bois sur différents lots torréfiés et comparé les résultats à la combustion de plaquettes forestières standards. Les résultats ont montré que le processus de torréfaction permet, par rapport à la matière brute, une réduction de 10% des émissions de particules par volume d'air. Le monoxyde de carbone ainsi que les hydrocarbures totaux sont en baisse de 40 à 90%. Les analyses effectuées montrent que des métaux lourds sont présents dans le combustible et se retrouvent dans les cendres. Cette problématique n'est toutefois pas liée au processus de torréfaction mais constitue une problématique générale liée à la combustion du bois, quel que soit le procédé considéré.

Pellets

Un débouché possible pour les plaquettes torréfiées est la pelletisation. L'OPair a été modifiée en cours de projet. Avant novembre 2015, les exigences de cette ordonnance relatives aux pellets concernaient uniquement le type de lubrifiant utilisé dans la presse à pellets. Les pellets torréfiés ne posaient donc pas de problème vis-à-vis de l'OPair.

Suite à la modification de l'ordonnance, seuls les pellets répondant à la norme SN EN ISO 17225-2 (classe A1 ou A2) peuvent être mis sur le marché. Cette norme a été imposée afin de garantir la provenance des matières premières et établir une uniformité des pellets pour les consommateurs. Les pellets produits à partir des plaquettes torréfiées n'entrent donc pas dans le champ d'application de cette norme et ne pourraient actuellement pas être librement commercialisés. Selon la DGE-ARC, ces pellets seraient utilisables « directement » pour autant que les normes d'émissions des chaudières les brûlant respectent l'OPair. Ainsi, le producteur de pellets torréfiés pourrait les utiliser lui-même ou les distribuer directement auprès des consommateurs finaux (exploitants de chaudières).

Les résultats des tests effectués sur les plaquettes démontrent que la future conformité des pellets torréfiés par rapport aux normes ISO (ressource/matière première) et/ou EN-Plus (valorisation/marché/produit torréfié) dépendra fortement des matières entrantes. La production de pellets torréfiés n'ayant pas encore débuté, les émissions de leur combustion n'ont pas été mesurées durant le projet.

Comme déjà mentionné précédemment, pour obtenir une rentabilité économique, il est nécessaire d'avoir à disposition des ressources à coûts nuls ou négatifs, alors qu'on ne peut respecter les normes environnementales qu'en torréfiant du bois « propre ».

Torgaz

Le Torgaz est un gaz pauvre, qui crée des suies et autres résidus. Réussir à utiliser ce gaz pour faire de la cogénération est l'une des contraintes principales de ce projet. Le Torgaz est considéré comme une ressource dans le descriptif de projet. Or, il s'est avéré que ce gaz pose en réalité des problèmes importants (une autre étude menée à l'EPFL est arrivée à la même conclusion).

Ce gaz est assimilé à un combustible gazeux au sens de l'Annexe 5, ch. 41 de l'OPair. La combustion du Torgaz ne devrait pas nécessiter un traitement particulier des fumées, mais la DGE-ARC doit encore procéder à des mesures des émissions pour le garantir. Aucune analyse directe de Torgaz n'est disponible dans le rapport final du projet.

Evaluation de la durabilité, notamment au moyen d'une analyse du cycle de vie (ACV)

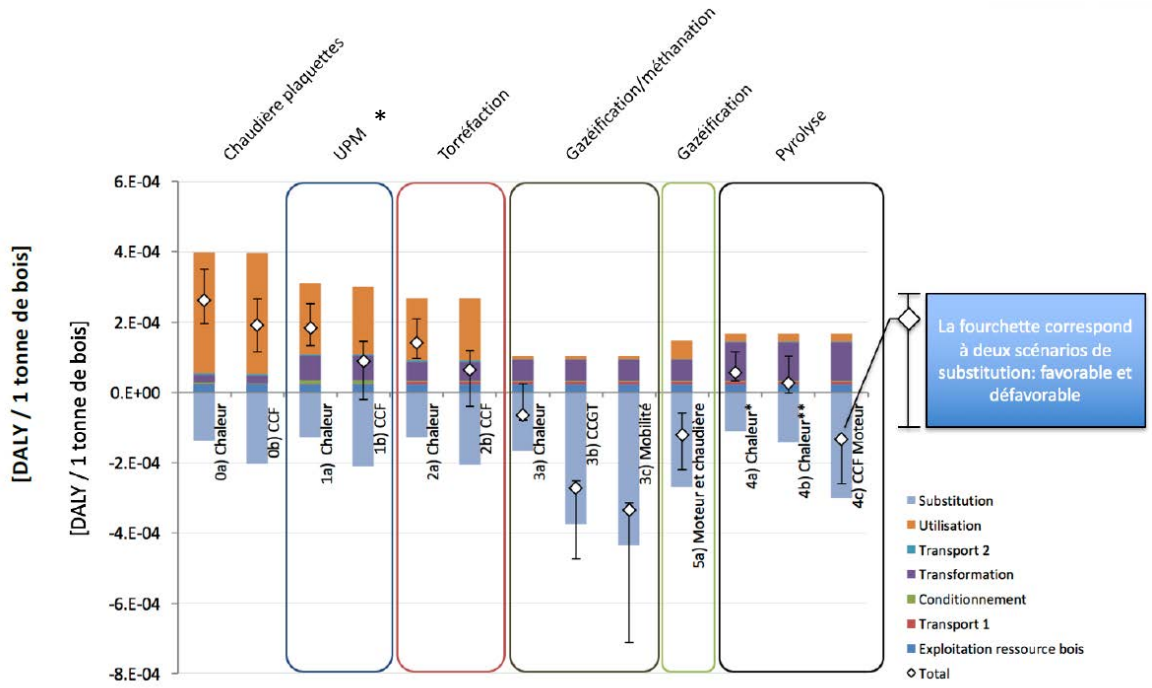
Aucune ACV n'était prévue dans le cadre de ce projet. Toutefois, en parallèle du programme des 100 mios, en vue de définir la stratégie bois-énergie du Canton (cf. chapitre 1.4), la DIREN a mandaté le bureau Quantis pour réaliser une étude plus large sur la filière bois (cf. note 13, page 24). Le but de cette étude était d'analyser le potentiel en termes de production d'énergie, de viabilité technique et économique et le bilan énergétique et environnemental de nouveaux projets de valorisation de la ressource bois, tout en assurant la cohérence de la politique cantonale en matière de valorisation du bois.

En ce qui concerne le projet Torplant, la conclusion de cette étude en regard de la stratégie bois-énergie du Canton est que « Le principal intérêt de la torréfaction est de pouvoir faciliter le stockage et le transport d'un combustible de qualité. Or, le besoin pour une solution de stockage ou de transport sur une distance importante reste à démontrer. ». En effet, le transport est marginal dans l'impact environnemental calculé pour les différentes utilisations du bois-énergie comparées dans cette étude.

Il ressort de cette étude que la torréfaction a un bilan sur la santé humaine plus favorable que les plaquettes non torréfiées, mais moins que la gazéification ou la pyrolyse (voir Figure 20 ci-dessous), notamment en raison des émissions en particules fines et d'oxyde d'azote générées lors de la phase de combustion.

Le porteur de projet convient dans son rapport final qu'il faudrait « faire une Analyse de Cycle de Vie complète du kWh produit sous forme de plaquettes, pellets ou poudre (en s'arrêtant au combustible dans un premier temps), en comparaison avec la biomasse séchée et sous les mêmes formes ».

Figure 20 : Empreinte environnementale, impacts générés et évités des technologies étudiées sur la santé humaine



** UPM = Unité de pelletisation mobile*

Source : *Etude « Analyse des systèmes de transformation du bois énergie », bureau Quantis, 2015*

4.3. LE SOUTIEN DU TISSU ÉCONOMIQUE VAUDOIS

Question 8.1 **L'effet multiplicateur économique est-il conforme aux prévisions ?**

L'effet multiplicateur (rapport entre le coût total du projet et la subvention) s'est élevé à 142%. Il est supérieur à celui calculé sur la base du budget de 107% car les dépassements de budget ont été absorbés par les partenaires du projet alors que la subvention n'a pas été augmentée.

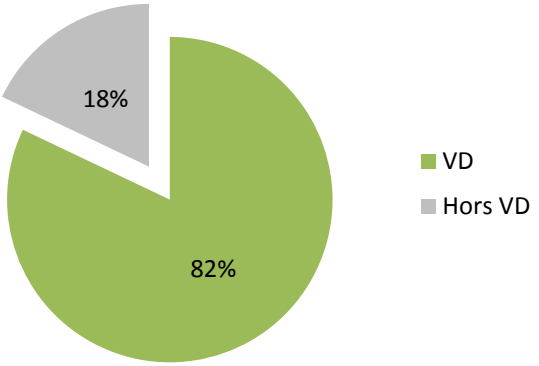
Au niveau du développement économique local, ce projet s'avère positif. L'entreprise vaudoise GRT SA est devenue partenaire du projet et entend poursuivre le développement du torréfacteur pour aboutir à un produit commercialisable.

DÉPENSES LIÉES AU PROJET

L'examen par la Cour des rapports financiers semestriels, visant à rechercher la localisation des différents fournisseurs et agréger les dépenses réelles, a permis de déterminer la part du budget du projet ayant été dépensée auprès d'entreprises basées dans le canton de Vaud (cf. Figure 21 ci-dessous).

Il ressort de cette analyse qu'environ 80% des coûts sont constitués de montants dépensés dans le canton de Vaud : il s'agit pour plus de moitié des salaires des collaborateurs de la HEIG-VD et de GRT SA. Dans les dépenses hors canton figurent les salaires des collaborateurs de Ökozentrum et une partie de l'équipement.

Figure 21 : Répartition des dépenses du projet HEIG-VD – Torplant



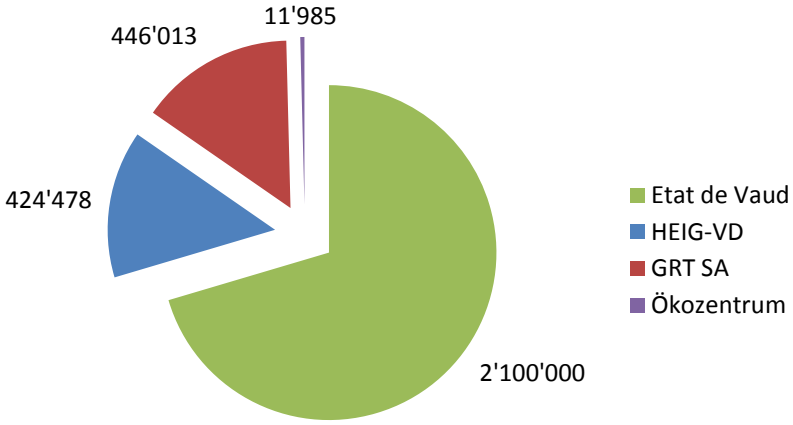
Source : *Cour des comptes sur la base des rapports financiers HEIG-VD – Torplant*

Le rapport entre le coût total du projet et la subvention de l'Etat est de 142% (effet multiplicateur). En faisant le même calcul sur le budget initial, il n'y avait quasiment pas d'effet multiplicateur puisque la subvention couvrait presque l'intégralité du budget (ratio de 107%).

GRT SA, la HEIG-VD et Ökozentrum ont finalement assumé une part plus grande que prévue des charges (cf. chapitre 4.1.3, paragraphe « Suivi financier »).

Les coûts pris en charge par chacun des participants au projet sont représentés dans la Figure 22 ci-dessous.

Figure 22 : Sources de financement du projet HEIG-VD – Torplant



Source : *Cour des comptes sur la base du rapport final HEIG-VD – Torplant*

CRÉATION D'EMPLOIS

Le projet n'a pas donné lieu à la création de places de travail supplémentaires. Cependant, la contribution du partenaire industriel GRT SA, correspondant à des heures travaillées non financées par le Canton, représente un poste de travail d'ingénieur à plein temps durant trois ans. De plus, GRT SA a prévu de poursuivre les activités de développement du torréfacteur jusqu'à sa commercialisation.

GÉNÉRATION D'AFFAIRES

HEIG-VD

La HEIG-VD souligne que ce projet a contribué au développement de sa position de leader en Suisse pour la R&D dans le domaine de la bioénergie et lui a permis de se faire connaître comme centre d'expertise au niveau européen.

En outre, la HEIG-VD a pu intégrer le Centre de Compétence Suisse pour la Recherche Energétique – SCCER Biosweet[37] – dédié à la biomasse pour les périodes 2014-2016 et 2017-2020 avec un financement externe de 264 kCHF/an.

GRT SA

Ce projet n'a pas donné lieu à la création de start-up toutefois l'entreprise vaudoise GRT SA bénéficie des résultats du projet et peut proposer à la vente des systèmes de séchage-torréfaction de biomasse basés sur le développement Torplant.

Aucun brevet n'a été déposé à ce jour, mais GRT SA bénéficie directement et exclusivement du savoir-faire et de la propriété industrielle acquise pendant le projet (un accord de licence a été signé entre l'entreprise et la HEIG-VD).

Au travers des différentes actions de promotion menées durant le projet, l'entreprise a gagné en visibilité au niveau de la Suisse romande, en particulier dans le domaine du bois-énergie.

Ökozentrum

Ökozentrum bénéficie du savoir-faire acquis concernant les performances de son système de combustion et de valorisation des gaz pauvres de torréfaction (Torgaz).

AVANTAGE POUR LE CANTON DE VAUD

Le Canton de Vaud a pu se positionner dans un projet novateur en matière d'énergie.

La DIREN s'est assurée que la mention du soutien de l'Etat de Vaud dans le cadre du programme des 100 millions figurait dans toutes les communications.

Une conférence de presse a été tenue conjointement par la HEIG-VD, GRT SA lors de l'inauguration officielle de l'unité pilote le 9 mai 2016 par Mmes les Conseillères d'Etat J. de Quattro et A.-C. Lyon.

L'installation pilote a reçu la visite de plusieurs groupes intéressés par le projet, notamment des membres d'Energie-bois Suisse et Swiss Engineering.

[37] Voir http://www.sccer-biosweet.ch/innovation-areas/torrefaction/ (site consulté le 24.08.2017)

5. RÉPONSE À LA QUESTION PRINCIPALE D'AUDIT, CONSTATATIONS ET RECOMMANDATIONS

QUESTION PRINCIPALE D'AUDIT :

Les subventions aux projets EPFL – Leclanché et HEIG-VD – Torplant contribuent-t-elles à l'atteinte des objectifs de développement des énergies renouvelables et de soutien du tissu économique vaudois ?

EPFL – Leclanché

Ce projet peut être considéré comme une réussite ; le dispositif de gestion et de stockage de l'énergie développé par l'EPFL, intégré au parc solaire de Romande Energie – EPFL, qui s'appuie sur une batterie de capacité industrielle construite par Leclanché, fonctionne et a permis de tester en grandeur réelle et avec succès le comportement d'un réseau électrique alimenté par des panneaux photovoltaïques. Il s'avère être un excellent outil et accueille régulièrement des visiteurs (investisseurs, clients potentiels, scientifiques, représentants politiques, concurrents).

L'usage du stockage proposé permet de réguler le réseau électrique face à des variations rapides. L'intégration des énergies renouvelables spontanément variables (électricité de source éolienne ou solaire) dans le réseau et la complexification qui en résulte pour leur gestion constitue un immense défi pour l'avenir. Un tel projet contribue donc à une gestion optimale des énergies renouvelables décentralisées.

En ce qui concerne la durabilité, l'absence d'une analyse du cycle de vie (ACV) et la difficulté, inhérente au projet, à définir le périmètre à analyser (qui va bien au-delà de la batterie) ne permettent pas de se prononcer sur les effets sur l'environnement liés à la technologie développée. Ceux-ci ont été abordés sommairement en incluant dans le rapport final du projet une évaluation de l'énergie grise de la batterie.

L'impact sur l'économie locale, qui s'est traduit par des emplois et des start-ups créés, ainsi que des débouchés et autres avantages pour les différents partenaires, est très positif. Ce projet a contribué à la notoriété et au rayonnement national et international de tous les partenaires impliqués, en particulier du Canton de Vaud comme acteur important de l'innovation.

HEIG-VD – Torplant

Ce projet, qui a été subventionné malgré des risques importants bien identifiés, a rencontré des obstacles techniques qui laissent penser que les objectifs opérationnels étaient trop ambitieux : notamment la production d'électricité, l'autonomie de fonctionnement, la commercialisation des pellets. Une unité pilote a été construite et a permis d'effectuer quelques essais tardifs de torréfaction de plaquettes rendus possibles grâce à la prolongation du délai du projet de cinq mois. Elle pose encore plusieurs problèmes ; des développements

supplémentaires sont nécessaires pour optimiser le système, qui est encore au stade expérimental, afin de le rendre commercialisable conformément aux objectifs initiaux, dans le but de produire de la chaleur par la combustion de pellets torréfiés.

Le planning n'a pas été respecté et les résultats obtenus ne correspondent pas aux objectifs, ni en termes d'autonomie de fonctionnement et de rendement de l'installation pilote, ni au niveau de la valorisation du Torgaz pour la production d'électricité qui aurait permis, dans le meilleur des cas, l'autonomie électrique du système de torréfaction.

En ce qui concerne la durabilité, les principaux impacts sur l'environnement ont été identifiés et le projet a cherché à les minimiser. Les essais de combustion n'ont porté que sur des plaquettes torréfiées et pas sur des pellets torréfiés qui n'ont pas pu être produits dans les délais de réalisation du projet. Des doutes subsistent sur la future conformité des pellets torréfiés par rapport aux normes, en particulier SN EN ISO 17225-2. Le porteur de projet convient dans son rapport final qu'il faudrait faire une ACV complète du kWh produit sous forme de plaquettes, pellets ou poudre, en comparaison avec la biomasse séchée et sous les mêmes formes.

En vue de définir la stratégie bois-énergie du Canton, la DIREN a fait réaliser une ACV plus large sur la filière bois, contenant le projet Torplant, qui pourra servir de référence à l'avenir. Elle permettra, pour tout nouveau projet dans ce domaine, de s'assurer de son insertion logique dans les filières énergies-matières des biomasses.

Au niveau du développement économique local, ce projet s'avère positif. L'entreprise Granit Technologies and Engineering (GRT) SA est devenue partenaire du projet. Même si ce dernier a été clôturé, cette société a annoncé vouloir poursuivre le développement du torréfacteur pour aboutir à un produit commercialisable.

Suivi de la DIREN

La DIREN a mis en place un système de contrôle permettant de suivre de manière rigoureuse l'avancement des projets tant du point de vue financier que scientifique, en bénéficiant de l'appui d'experts. Il convient de relever la manière nouvelle et originale lancée par le Conseil d'Etat, dans le cadre du domaine C du programme des 100 millions, de soutenir en même temps l'innovation, les Hautes Ecoles et le tissu économique. Dans le suivi, cela s'est notamment traduit par l'intégration au groupe de suivi de deux représentants d'Innovaud dès le lancement des projets, en vue de fournir très en amont des conseils en matière de commercialisation des produits, d'innovation et de transfert de technologie.

S'agissant de Torplant, la construction du prototype ayant couvert toute la durée planifiée du projet, le suivi a particulièrement porté sur les difficultés techniques rencontrées. Sauf à mettre un terme au financement du projet et donc à perdre l'investissement consenti, la DIREN n'avait que peu de moyens d'action.

CONCORDANCE ENTRE LES OBJECTIFS DU DOMAINE C DU PROGRAMME DES 100 MILLIONS

Les deux objectifs du programme des 100 mios, domaine C, fixés par le Conseil d'Etat, étaient le soutien au développement des nouvelles énergies renouvelables et le soutien à l'économie locale. A cela s'ajoutaient les critères de sélection des projets suivants fixés par le Conseil d'Etat :

- projets menés par des Hautes Ecoles vaudoises ou réalisés en étroite collaboration avec elles,
- en stade de développement avancé ou en phase de production de prototypes,
- pouvant générer des affaires dans les entreprises, start-ups ou spin-offs vaudoises.

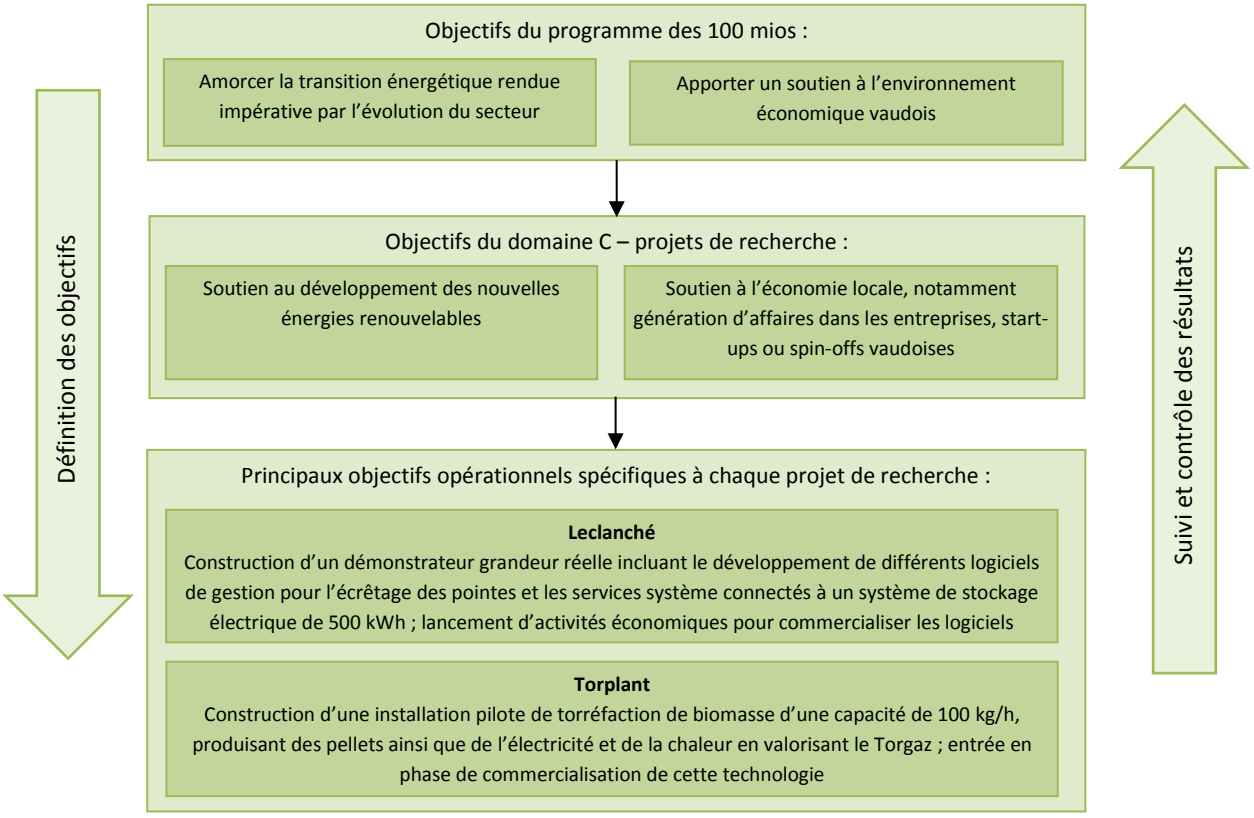
Satisfaire les deux objectifs du programme de même qu'intégrer les critères susmentionnés s'est avéré particulièrement contraignant. L'audit des deux projets montre qu'il est difficile de répondre à l'objectif de soutien à l'économie locale tout en se donnant les meilleures chances de trouver des projets favorisant le développement des nouvelles énergies renouvelables. En outre, le risque existe de favoriser un objectif au détriment de l'autre, voire de compromettre son atteinte. Pour le domaine C qui concerne des projets de recherche, il aurait été souhaitable de hiérarchiser les objectifs afin d'éviter toute tension entre eux.

Constatation n°1	Exiger des projets de recherche, qui comportent des incertitudes et risques élevés, de répondre à la fois aux objectifs de développement des énergies renouvelables et de soutien à l'économie locale, par le biais des Hautes Ecoles, a constitué un défi important. Pour de tels projets à haute technicité, la volonté de soutenir l'économie locale peut porter atteinte au premier objectif de développement des énergies renouvelables en limitant notamment le nombre de projets et de partenaires éligibles.
Recommandation n°1	Dans le cadre de futurs soutiens à des projets de recherche, fixer des objectifs conciliables entre eux, voire les hiérarchiser, afin de sélectionner les projets offrant les meilleures chances de succès dans le domaine concerné.

OBJECTIFS DE PROJETS EN LIEN AVEC LES OBJECTIFS DU PROGRAMME DES 100 MILLIONS

Des audits précédents de la Cour[38] ont révélé, dans divers domaines d'activités du canton, un manque de clarté dans les objectifs poursuivis, l'insuffisance voir l'absence d'instruments adéquats pour mesurer leur atteinte et prendre les mesures nécessaires le cas échéant. Or, il incombe en premier lieu au canton – que ce soit pour la qualité de la conduite de sa stratégie ou pour satisfaire à l'obligation de rendre compte de son action et de l'utilisation de l'argent public – de s'assurer de l'atteinte de ses objectifs. La LSubv établit par ailleurs des exigences à ce niveau.

Les objectifs opérationnels qui ont été fixés pour les projets de recherche audités fournissent les bases nécessaires permettant de mesurer leur atteinte. Les fonds ayant été obtenus grâce au programme des 100 mios, les liens entre les objectifs de ces projets et ceux du programme des 100 mios méritent d'être exposés clairement. Compte tenu des caractéristiques des deux projets, les objectifs en matière de développement des énergies renouvelables ne sont toutefois pas quantifiables.



[38] Notamment « Audit de la performance du Canton de Vaud dans sa mission de contrôle de l'efficacité des transports publics » (rapport n°25 du 5 décembre 2013) et « Les subventions aux projets régionaux permettent-elles le développement économique du canton et des régions » ? (rapport n°30 du 25 février 2015)

Constatation n°2	S'agissant des deux projets de recherche innovants audités, leurs objectifs n'ont pas pu être quantifiés en termes d'énergie produite/stockée et d'impacts sur l'économie. Toutefois, le lien entre les objectifs des projets et ceux du programme des 100 millions, et en particulier ceux du domaine C (développement des nouvelles énergies renouvelables et soutien à l'économie locale), aurait mérité d'être exposé de manière plus détaillée.
Recommandation n°2	Pour les projets à venir, fixer des objectifs quantitatifs, de préférence assortis d'indicateurs, de manière à pouvoir mesurer les résultats atteints en matière d'efficacité, d'efficience et de durabilité. Pour les projets de recherche qui rendent la fixation d'objectifs quantifiés difficile, dans les documents décisionnels, exposer de manière suffisamment explicite les liens entre les objectifs d'un projet et ceux du programme dont il est issu.

OBJECTIFS DE PROJETS RÉALISTES ET NIVEAU DE RISQUE ACCEPTABLE

Le projet EPFL – Leclanché, qui a regroupé des partenaires expérimentés dans les domaines concernés, n'a pas connu de problèmes ou de retards importants. Le démonstrateur développé sur le site de l'EPFL fonctionne dans des conditions réelles et a donné lieu à des produits commercialisables. Les résultats obtenus correspondent aux objectifs qui avaient été définis.

En revanche, s'agissant du projet HEIG-VD – Torplant, les objectifs n'ont pas été atteints :

- L'unité pilote ne fonctionne pas de manière autonome, une surveillance et une intervention humaine constante est nécessaire.
- Durant les tests effectués, la capacité nominale s'est élevée à seulement 61 kg/h au lieu des 100 kg/h visés.
- Le prix de revient des pellets, dont dépend l'acceptation des pellets par le marché, n'est pas connu car il dépend des ressources entrantes et des coûts de pelletisation.
- Le bilan économique global est positif uniquement avec des ressources entrantes à coûts nuls (ou un mélange de déchets à coûts négatifs et de produits forestiers à coûts positifs).
- La technique de valorisation du Torgaz par production de chaleur et d'électricité n'est pas validée. Le couplage du torréfacteur avec le système Ökozentrum n'a pas fonctionné comme prévu. La valorisation électrique via le Torgaz semble abandonnée avec la volonté de mettre un brûleur à bois pour le Torgaz, technologie plus simple et robuste.

Compte tenu de ces faits, on peut penser qu'il aurait été préférable de fixer des objectifs plus modestes, par exemple en séparant le projet en plusieurs étapes.

Constatation n°3	Dans les grandes lignes, le projet EPFL – Leclanché s'est déroulé tel que prévu et ses objectifs réalistes ont été atteints. En ce qui concerne le projet HEIG-VD – Torplant, la décision d'octroyer une subvention a été prise en présence de risques importants, qui se sont pour la plupart réalisés. Les importantes difficultés techniques qui ont jalonné le projet n'ont pas permis de réaliser une unité pilote autonome à un stade industriel, permettant de produire des pellets torréfiés commercialisables, tout en valorisant le Torgaz par une production de chaleur et d'électricité.
Recommandation n°3	Lors de la décision d'octroi de subventions, se fonder sur des objectifs de projets et une planification réalistes, un niveau de risques acceptable, en étant conscients des difficultés inhérentes aux projets de recherche.

EVALUATION DE LA DURABILITÉ

L'un des buts du développement des énergies renouvelables est de réduire les impacts sur l'environnement, à un coût acceptable. Lors de l'élaboration des descriptifs de projets, il aurait été pertinent de s'interroger sur la durabilité et en particulier sur l'utilité d'effectuer une analyse du cycle de vie (ACV). Une ACV permet d'identifier les éventuels aspects négatifs des projets afin de tenter de les minimiser.

Pour le projet EPFL – Leclanché, seules figurent dans le rapport final des indications sur l'énergie grise de la batterie intégrée dans le container de l'EPFL, fondées sur des informations disponibles en ligne. Or, le calcul de l'énergie grise de la batterie peut et doit être effectué. Le rapport final mentionne qu'une étude devrait être lancée sur ce point. Concernant une ACV mesurant l'impact du projet (qui porte non seulement sur la batterie mais également sur la gestion du réseau électrique) et de la technologie développée, elle s'avère complexe à réaliser. L'échelle du projet EPFL – Leclanché ne constitue pas la granulométrie adéquate pour chiffrer cette problématique.

Aucune ACV n'a été prévue dans le cadre du projet HEIG-VD – Torplant. Or, le porteur de projet convient dans son rapport final qu'il faudrait « faire une Analyse de Cycle de Vie complète du kWh produit sous forme de plaquettes, pellets ou poudre (en s'arrêtant au combustible dans un premier temps), en comparaison avec la biomasse séchée et sous les mêmes formes ». En vue de définir la stratégie bois-énergie du Canton, la DIREN a fait réaliser une ACV plus large sur la filière bois, contenant le projet Torplant, qui pourra servir de référence à l'avenir.

Constatation n°4	Comme les énergies fossiles qu'elles cherchent à remplacer, les technologies innovantes liées au développement des nouvelles énergies renouvelables peuvent engendrer des effets négatifs sur l'environnement. Les attentes de la société envers ces nouvelles technologies requièrent de plus en plus souvent une justification en termes d'impacts environnementaux. Des résultats potentiellement positifs d'une analyse du cycle de vie (ACV) permettent d'augmenter l'acceptabilité environnementale et sociale des nouvelles technologies.

Recommandation n°4	Pour les projets à venir, examiner la pertinence d'exiger une évaluation de la durabilité des projets, en particulier sous la forme d'une ACV.

CONFLITS D'USAGE ET SYSTÈME DE VALORISATION DANS LES FILIÈRES ÉNERGIE-MATIÈRE DES BIOMASSES (PROJET HEIG-VD – TORPLANT)

Développer ou produire plus d'énergie renouvelable grâce à la torréfaction ne dépend pas seulement de la technologie mise au point mais aussi :

- des ressources entrantes : davantage d'énergie renouvelable peut être produite grâce aux ressources provenant des filières matières, mais potentiellement au détriment de ces mêmes filières (des conflits d'usage sont possibles).
- du système de valorisation énergétique de la matière : si les matières premières utilisées pour la torréfaction sont celles allant actuellement en filière incinération, il s'agira de comparer les rendements respectifs (incinération ou torréfaction) des systèmes de production d'énergie sous forme de chaleur et d'électricité.

La valorisation de la biomasse peut prendre plusieurs formes. Pour tout projet dans ce domaine, il est donc important de prendre en considération l'ensemble des valorisations possibles de la biomasse. Cette préoccupation a été prise en compte avec l'intégration, dans le groupe de pilotage du projet, de responsables cantonaux des forêts et des déchets (compostage, etc.).

Constatation n°5	Une étude visant à assurer la cohérence de la politique cantonale en matière de valorisation du bois a été menée dans le cadre de l'élaboration de la stratégie bois-énergie du Canton mais après le lancement du projet Torplant. Lorsque la subvention a été accordée au projet HEIG-VD – Torplant, il n'était donc pas possible de s'assurer au préalable de son insertion dans les filières énergies-matières des biomasses.
Recommandation n°5	Pour les projets à venir dans le domaine de la biomasse, prendre en compte la planification cantonale aussi bien dans le domaine forestier que dans celui des déchets verts. Les futurs soutiens à des projets devraient intégrer les acteurs des filières matière (forêts, construction, scierie, déchets, etc..) et leurs besoins, qui ne sont pas forcément en phase avec les besoins des filières énergétiques.

6. REMARQUES DE L'ENTITÉ AUDITÉE

canton de vaud

Direction générale de l'environnement (DGE)

Direction générale

Rue Caroline 11
1014 Lausanne

canton de vaud COUR DES COMPTES 13 NOV. 2017

Madame la Présidente
Eliane Rey
Cour des comptes
Rue de Langallerie 11
1014 Lausanne

Réf. : CNT/LBR/drd/DIREN 11.02

Lausanne, le 10 novembre 2017

Rapport n°42 du 29 novembre 2017 de la Cour des comptes concernant le « Domaine C – Appui à des projets des Hautes écoles » » du programme « 100 millions pour les énergies renouvelables et l'efficacité énergétique »

Madame la Présidente,

Nous vous remettons ci-dessous nos observations concernant votre audit des projets de recherche « *Système pilote de stockage d'énergie de 500 kWh pour le contrôle des réseaux électriques de distribution avec génération distribuée* » (appelé, par souci de simplification, projet « *Leclanché* ») et « Torplant », subventionnés dans le cadre du programme « *100 millions pour les énergies renouvelables et l'efficacité énergétique* ».

Remarque générale

La manière la plus courante d'évaluer la réussite d'un projet consiste à confronter les objectifs, fixés ab initio avec les résultats obtenus à la fin de projet. Cette démarche est applicable à la plus grande partie des projets soutenus dans le cadre du « programme 100 millions ». Ainsi, par exemple, dans le cadre du premier volet du programme (volet A1) qui soutient l'isolation des bâtiments et le remplacement des chauffages électriques à résistance, on peut aisément déterminer les surfaces des bâtiments concernés, calculer la quantité d'énergie économisée ainsi que les montants qui ont profité à l'économie vaudoise. Il est donc possible d'établir un lien direct et chiffré entre les résultats des projets et les objectifs du « programme 100 millions ».

Cela est bien entendu beaucoup plus complexe, voire impossible, à établir pour le volet D du programme, qui consiste à diffuser de l'information et à soutenir la formation de spécialistes de l'énergie.

Et il en va d'ailleurs de même pour le volet C « Appui à des projets des hautes écoles ». En effet, même pour des projets de recherche appliquée dont la maturité est relativement proche d'une possible commercialisation, il n'est pas réaliste d'espérer mesurer à la fin du projet les quantités d'énergie qui pourraient être économisées ou produites, et encore moins de chiffrer les montants qui seront injectés, à terme, dans l'économie vaudoise.

Département du territoire et de l'environnement – DTE
Direction générale de l'environnement – DGE
Direction générale
www.vd.ch/dge – T + 41 21 316 44 22 – info.dge@vd.ch

En effet, même en cas de réussite technique du projet, il va se passer généralement passablement de temps avant que l'on assiste à un déploiement technique et commercial qui permette d'articuler des chiffres crédibles correspondant à la réalité. Soulignons de plus qu'une réussite technique n'implique pas nécessairement une réussite commerciale.

Ainsi, en termes de suivi de projet de recherche, l'évaluation chiffrée ne peut porter que sur des objectifs opérationnels et à cours terme.

Le Conseil d'Etat a fait le choix de soutenir des projets de recherche par une démarche qui se situe à mi-chemin entre le soutien conventionnel apporté par des organismes tels que la CTI et le soutien à l'entrepreneuriat et l'innovation tel que le pratique par exemple Innovaud. En plus du soutien financier du projet lui-même, l'accompagnement mis en place par la Direction de l'énergie de la DGE incitait régulièrement les porteurs de projet à s'interroger sur la finalité commerciale de leurs projets. Il nous semble important de souligner qu'il s'agit d'une démarche innovante, qui a beaucoup sollicité les porteurs de projet, et qui se distingue fortement des standards usuels du travail de notre administration.

Une bonne compréhension des particularités précitées de ces projets est essentielle pour bien mettre en perspective les conditions et recommandations qui suivent. En effet, il en découle que votre audit, dans le cas précis du domaine C, porte sur une mission qui a manifestement et en grande partie un caractère de prototype par rapport aux missions de base et au savoir-faire de notre administration et que nous entendons donc vos constatations et recommandations à ce titre.

Constatations et recommandations

N°1: Concordance entre les objectifs du domaine C du programme 100 millions

La constatation de la Cour des comptes est pertinente et met en évidence avec raison le fait que de très nombreux critères ont été fixés aussi bien pour le choix des projets que pour encadrer leur développement. Cela étant, comme rappelé ci-dessus, une telle action menée par un canton constituait une démarche originale et innovante qui a nécessité une phase d'apprentissage et de découverte.

Si une telle action devait être lancée à nouveau, il y aurait en effet lieu de revoir un certain nombre d'éléments dont, en particulier, la priorisation entre les divers critères et objectifs.

N°2: Objectifs de projets en lien avec les objectifs du programme des 100 millions

Comme exposé en préambule, dans le cas particulier du volet C, les objectifs ne peuvent être quantifiés en termes d'énergie produite ou économisée ou d'impact à court terme sur l'économie mesurable. Les seuls indicateurs chiffrés sont donc inévitablement des indicateurs techniques et opérationnels rendant compte du fonctionnement du système développé et de l'avancement du projet.

Département du territoire et de l'environnement – DTE
Direction générale de l'environnement – DGE
Direction générale
www.vd.ch/dge – T + 41 21 316 44 22 – info.dge@vd.ch

N°3: Objectifs de projet réalistes et niveau de risque acceptable

Nous ne pouvons que partager, sur le fond, la constatation de la Cour et sa recommandation qui est « de se fonder sur des objectifs et une planification réalistes ainsi que sur un niveau de risque acceptable ».

Comme vous le relevez, la notion de risque est inhérente aux projets de recherche. Dans ce domaine, la fin d'une étape apporte généralement un certain nombre de réponses mais pose également souvent des questions nouvelles ou nécessite des compléments qui font que plusieurs itérations sont nécessaires avant que le but recherché soit finalement atteint. Il ne faut donc pas raisonner en termes de réussite ou d'échec définitifs lors du choix d'un projet de recherche mais prendre en compte le fait qu'un aboutissement partiel fait partie d'une démarche itérative tout à fait normale de recherche et de développement.

N°4: Evaluation de la durabilité

D'une manière générale, nous sommes en parfait accord avec votre recommandation qui est, « pour les projets à venir, de s'interroger sur la pertinence d'exiger une évaluation de la durabilité des projets, en particulier sous la forme d'une ACV ».

Dans le cas particulier cependant, le délai relativement court dans lequel les projets devaient se dérouler ainsi que les budgets alloués faisaient qu'il aurait été difficile d'y intégrer une analyse de cycle de vie complète. Ce d'autant plus que, comme vous le relevez pour ce qui est du « projet Leclanché » notamment, le périmètre sur lequel faire porter l'analyse de cycle de vie n'est pas aisé à déterminer.

Soulignons encore que ces deux projets ne sont pas des objets pour eux-mêmes mais que, s'inscrivant dans un contexte plus large, l'étape de leur analyse approfondie sous l'angle de la durabilité pourra être menée à bien dans une phase ultérieure et cela, sans doute, avec une vision plus large des enjeux.

Par ailleurs, pour ce qui est du projet Torplant, la Direction de l'énergie de la DGE a mandaté, dans le cadre de l'élaboration de la stratégie cantonale du bois-énergie, un bureau spécialisé, en parallèle au déroulement du projet de recherche, pour réaliser une étude plus large de type ACV.

N°5: Conflit d'usage et système de valorisation dans les filières énergie – matière des biomasses (projet HEIG-VD – Torplant)

Nous partageons vos réflexions consistant à dire qu'il convient d'adopter une vision globale des ressources de biomasse de notre canton afin d'éviter autant que faire se peut les conflits entre les divers gisements de biomasse. C'est d'ailleurs avec cette volonté qu'une stratégie du bois-énergie a été élaborée en collaboration avec tous les acteurs des filières concernées et va être présentée prochainement.

Il convient tout de même de rappeler, s'agissant du développement des filières du bois-énergie, que l'Etat ne peut que mettre à disposition des informations, soutenir certains projets particulièrement intéressants et fixer des conditions cadres. Pour le reste, rappelons qu'il ne s'agit pas d'une économie planifiée et que les projets et technologies qui émergent finalement se développent dans le cadre d'un marché libéralisé.

Département du territoire et de l'environnement – DTE
Direction générale de l'environnement – DGE
Direction générale
www.vd.ch/dge – T + 41 21 316 44 22 – info.dge@vd.ch

En conclusion, nous saluons le travail d'analyse mené par la Cour des comptes et relevons le très bon état d'esprit dans lequel s'est passé cet audit. Sous réserve des remarques formulées ci-dessus, nous prendrons bien évidement en compte les recommandations formulées, tout particulièrement celles liées à la durabilité des projets.

En restant à votre disposition pour tout renseignement complémentaire, nous vous prions d'agréer, Madame la Présidente, nos salutations distinguées.

Cornelis Neet
Directeur général

Laurent Balsiger
Directeur de l'énergie

Copie

- Mme Jacqueline de Quattro, Conseillère d'Etat et Cheffe du DTE

Département du territoire et de l'environnement – DTE
Direction générale de l'environnement – DGE
Direction générale
www.vd.ch/dge – T + 41 21 316 44 22 – info.dge@vd.ch

ANNEXES

Annexe I : Financement et descriptifs des projets de recherche 89

Annexe II : Système technologique et système énergétique 94

Annexe III : Exemple d'un projet de recherche demandant une ACV 96

Annexe IV : Statistique suisse production d'électricité 97

ANNEXE I : FINANCEMENT ET DESCRIPTIFS DES PROJETS DE RECHERCHE

EPFL

Cinq projets menés par l'EPFL sont financés dans le cadre de ce programme. Les quatre premiers projets ont fait l'objet d'une proposition acceptée par le Conseil d'Etat en juillet 2013. La PCE pour le projet EPFL – Leclanché a quant à elle été acceptée en juillet 2014. Le budget de financement de ces projets se découpe comme suit :

Projet	Sources de financement	2013	2014	2015	2016	2017	*TOTAL*
LECLANCHE	Part Etat de Vaud	0	1'083'750	672'000	214'250	0	*1'970'000*
	Contrib. EPFL	0	85'150	85'150	85'150	0	*255'450*
	Contrib. de tiers	0	312'750	342'380	607'220	0	*1'262'350*
	Sous-total	*0*	*1'481'650*	*1'099'530*	*906'620*	*0*	*3'487'800*
HYPES	Part Etat de Vaud	323'500	859'000	345'500	128'500	0	*1'656'500*
	Contrib. EPFL	39'000	44'500	24'000	18'500	0	*126'000*
	Contrib. de tiers	65'000	147'000	153'500	111'000	0	*476'500*
	Sous-total	*427'500*	*1'050'500*	*523'000*	*258'000*	0	*2'259'000*
MICROCOGEN	Part Etat de Vaud	327'600	593'800	399'600	0	0	*1'321'000*
	Contrib. EPFL	5'700	10'700	10'200	0	0	*26'600*
	Contrib. de tiers	21'100	136'000	60'500	0	0	*217'600*
	Sous-total	*354'400*	*740'500*	*470'300*	*0*	*0*	*1'565'200*
RECOGEN	Part Etat de Vaud	123'373	376'469	447'626	243'914	93'634	*1'285'016*
	Contrib. EPFL	43'701	147'401	63'301	39'200	19'600	*313'203*
	Contrib. de tiers	61'468	84'672	95'207	92'395	83'382	*417'124*
	Sous-total	*228'542*	*608'542*	*606'134*	*375'509*	*196'626*	*2'015'353*
ORC-ORC	Part Etat de Vaud	296'336	370'784	262'174	185'706	0	*1'115'000*
	Contrib. EPFL	231'920	63'840	63'840	53'200	0	*412'800*
	Contrib. de tiers	0	0	0	0	0	0
	Sous-total	*528'256*	*434'624*	*326'014*	*238'906*	*0*	*1'527'800*
TOTAL projets EPFL		**1'538'698**	**4'315'816**	**3'024'978**	**1'779'035**	**196'626**	**10'855'153**

Sources *: Cour des comptes sur la base de : pour les quatre premiers projets « Appui à des projets des Hautes Ecoles, projets de l'EPFL vue d'ensemble, mars 2013 », pour EPFL – Leclanché descriptif de projet de mai 2014*

Ci-dessous sont reprises les descriptions sommaires des cinq projets rédigées avant leur lancement :

Leclanché[39] – subvention CHF 1'970'000

Le but de ce projet est de disposer d'un démonstrateur pour compenser les flux de puissance résultant de la production d'une partie du parc photovoltaïque de l'EPFL et circulant dans une ligne du réseau de moyenne tension de l'EPFL.

En donnant la possibilité de mener les développements nécessaires à sa maturité technologique, ce projet permet à l'ensemble des partenaires impliqués de parachever la transformation du stockage d'énergie en véritable produit commercialisable et utilisable pour plusieurs applications dans les réseaux électriques de distribution.

Hypes[40] – subvention CHF 1'656'500

Le but du projet est de transformer le nouveau concept de gestion et stockage écologique d'énergie par air comprimé, développé à l'EPFL, en un produit techniquement mature et prêt pour l'industrialisation et la commercialisation. Une première étape consistera en la réalisation d'un système pilote d'au moins 25kW. Après une phase de test en laboratoire, ce système sera ensuite intégré à une centrale photovoltaïque, mise à disposition par la société SI-REN SA, et utilisé pour lisser sa production journalière.

Microcogen[40] – subvention CHF 1'321'000

L'objectif de ce projet est de développer, réaliser et tester un système intégré de micro-cogénération (production simultanée d'électricité et de chaleur) à haute efficacité énergétique. Le système proposé est basé sur l'utilisation de turbines particulières (scroll à haut rapport de détente) alimentées par une chaudière à biomasse chauffant de l'huile thermique à haute température. Un tel système permet la production économique de courant vert et peut fournir également des prestations de chaleur à 60° C, ce qui permet, par exemple, de produire de l'eau chaude sanitaire.

Recogen[40] – subvention CHF 1'285'016

Le projet consiste à faire passer une unité de pile à combustible existante de 1 kWe à 2,5 kWe. Le système intègre une nouveauté: une recirculation à haute température d'une partie des gaz de sortie de la pile à l'aide d'un microcompresseur entraîné par une microturbine à vapeur, ce qui permet d'améliorer le rendement.

ORC-ORC[40] – subvention CHF 1'115'000

Il s'agit du développement d'un concept original de pompe à chaleur utilisant notamment un groupe turbine–compresseur sur palier à fluide frigorigène gazeux. Les résultats comprendront une unité de PAC thermique pré-industrialisable de 40 kWth pouvant être alimentée par des sources diverses (chaudière à bois, panneaux solaires thermiques, rejets thermiques d'unités de cogénération, etc.). La première unité sera pour des installations de chauffage basse température à partir de sources supérieures à 0 °C (ex. sondes géothermiques ou climatisation.

[39] Source : Descriptif de projet de mai 2014
[40] Source : Appui à des projets des Hautes Ecoles, projets de l'EPFL vue d'ensemble, mars 2013

HEIG-VD

Trois projets menés par la HEIG-VD sont financés dans le cadre de ce programme Le budget de financement de ces projets se découpe comme suit :

Projet	Sources de financement	2013	2014	2015	2016	2017	*TOTAL*
TORPLANT	Part Etat de Vaud	1'006'112	445'280	400'360	248'248	0	*2'100'000*
	Contrib. HEIG-VD	36'045	41'017	39'917	40'017	0	*156'996*
	Contrib. de tiers	0	0	0	0	0	*0*
	Sous-total	*1'042'157*	*486'297*	*440'277*	*288'265*	*0*	*2'256'996*
BâtiTech	Part Etat de Vaud	271'595	456'151	175'125	26'690	0	*929'561*
	Contrib. HEIG-VD	47'173	55'097	31'773	19'287	0	*153'330*
	Contrib. de tiers	79'740	135'360	94'080	17'640	0	*326'820*
	Sous-total	*398'508*	*646'608*	*300'978*	*63'617*	*0*	*1'409'711*
MicroXyloCogen	Part Etat de Vaud	4'387	111'690	285'357	400'900	97'666	*900'000*
	Contrib. HEIG-VD	10'583	60'583	46'000	46'000	38'334	*201'500*
	Contrib. de tiers	17'580	50'000	60'000	60'000	55'000	*242'580*
	Sous-total	*32'550*	*222'273*	*391'357*	*506'900*	*191'000*	*1'344'080*
TOTAL projets HEIG-VD		**1'473'215**	**1'355'178**	**1'132'612**	**858'782**	**191'000**	**5'010'787**

Sources : *Descriptif de projet Torplant, avenant n°1 de juillet 2013, descriptif de projet BâtiTech, avenant n°1 de juillet 2013, descriptif de projet MicroXyloCogen, avenant n° 1 d'août 2013, après validation par le Conseil d'Etat du 5 juin 2013*

Les trois projets étaient décrits sommairement de la manière suivante :

Torplant[41] – subvention CHF 2'100'000

A partir des prototypes développés à la HEIG-VD, réalisation d'une installation pilote de torréfaction de la biomasse produisant principalement des pellets (pour le chauffage) mais également de l'électricité (grâce aux gaz de torréfaction) et de la chaleur. Le projet est mené par la HEIG-VD mais est réalisé au technopôle d'Orbe. Une start-up pourrait par la suite commercialiser les unités de production ou la technologie être cédée à une entreprise active dans ce domaine.

BâtiTech[42] – subvention CHF 929'561

Regroupe trois projets différents en lien avec la technique du bâtiment. Le premier projet développe un élément de façade préfabriquée permettant d'isoler thermiquement ainsi que de produire de l'électricité et de la chaleur. Le deuxième réalise des capteurs solaires invisibles pour des bâtiments protégés. Le troisième pratique un écobilan d'éléments de construction produits dans le canton de Vaud.

[41] Source : Descriptif de projet Torplant, avenant n° 1 de juillet 2013
[42] Source : Descriptif de projet BâtiTech, avenant n° 1 de juillet 2013

MicroXyloCogen[43] – subvention CHF 900'000

Développement d'un prototype de petite installation de cogénération qui, couplée avec un poêle à bois par exemple, permettrait de produire de l'électricité. Installation de petite puissance pour l'habitat individuel qui vise une production en grande série afin de répondre au besoin de produire toujours plus d'électricité à partir d'énergies renouvelables.

UNIL

Volteface[44] – subvention CHF 1'000'000

Un seul projet est financé dans le cadre du programme des 100 mios avec l'UNIL. Le budget de son financement se découpe comme suit :

Sources de financement	2013	2014	2015	2016	2017	*TOTAL*
Part de l'Etat de Vaud	0	359'000	253'000	233'000	155'000	*1'000'000*
Contributions UNIL	0	93'000	105'000	130'000	225'000	*553'000*
Contributions de tiers	35'000	82'000	106'000	76'000	123'000	*422'000*
TOTAL projet UNIL – Volteface	**35'000**	**534'000**	**464'000**	**439'000**	**503'000**	**1'975'000**

Source : *Cour des comptes, sur la base de descriptif de projet UNIL – carrefour de la durabilité, avenant n° 1 de décembre 2013 après validation par le Conseil d'Etat du 5 juin 2013*

Ce projet est différent de ceux menés par l'EPFL et la HEIG-VD car il ne consiste pas dans la poursuite d'un projet technologique « en stade de développement avancé » ou « en phase de production d'un prototype » (voir ci-dessus paragraphe « sélection des projets ») mais dans une étude des comportements humains, portant sur des aspects de gestion énergétique et de durabilité qui étaient jusqu'alors peu étudiés, offrant ainsi un caractère complémentaire aux solutions technologiques. L'UNIL met notamment à profit ses compétences en sciences humaines et économiques pour œuvrer dans la recherche de solutions en termes de gouvernance et de comportement. Concrètement, cela se traduit par un projet qui cherche à identifier, documenter et mettre en valeur certaines problématiques environnementales, notamment dans le cadre d'ateliers et de forum réalisés en partenariat avec des entités publiques ou privées de la région.

Dans ce cadre, l'UNIL entend mettre en place une plateforme de projets de recherche-action, élaborés de manière participative qui mette en lien les compétences des chercheurs, des experts de l'énergie et les demandes de la société vaudoise. Cette plateforme a pour but de proposer et d'étudier la réalisation de nouveaux modes de vie, qui tiennent compte des limites des ressources de la planète et des préoccupations sociales actuelles.

Ce projet vise deux types de résultats : dans un premier temps, les résultats des recherches-actions doivent permettre de mieux cerner les blocages psychologiques et sociaux de la société

[43] Source : Descriptif de projet MicroXyloCogen, avenant n° 1 d'août 2013, après validation par le Conseil d'Etat du 5 juin 2013
[44] Source : Descriptif de projet UNIL, avenant n° 1 de décembre 2013

afin d'améliorer l'acceptation, et donc l'efficacité, des mesures de durabilité, particulièrement celles énergétiques, mises en place par le Canton ; dans un deuxième temps, la méthodologie innovante et « réplicable » de génération de ces projets de recherche-action constitue en elle-même un résultat qui pourrait être transposée à d'autres domaines, dans un périmètre plus large, permettant à ce projet vaudois de rayonner à l'échelle romande.

SUPPLÉMENT DE 1 MIO

Le montant supplémentaire attribué au domaine C en été 2016 est destiné à soutenir les partenaires industriels, ayant connu des difficultés liées à la problématique du franc fort, pour la commercialisation de nouveaux produits développés dans le cadre des projets de recherche.

A la date de l'audit, CHF 250'000 ont été affectés à deux entreprises vaudoises partenaires du projet HEIG-VD – MicroXyloCogen. Aucune autre entreprise partenaire n'ayant nécessité de soutien en lien avec la problématique du franc fort, une réflexion est en cours pour réaffecter le solde de CHF 750'000 à un autre projet dans le cadre du programme des 100 mios.

ANNEXE II : SYSTÈME TECHNOLOGIQUE ET SYSTÈME ÉNERGÉTIQUE

Un transformateur énergétique est un composant qui permet d'adapter une certaine quantité d'énergie d'une forme donnée (input) en une énergie d'une forme différente (output valorisable). L'adaptation concerne le transfert de qualité, de temps ou de lieu.

C'est le constituant clé du système énergétique, mais c'est aussi le fruit d'un système technologique qui l'élabore, le construit et le développe. Il est donc à la fois :

1. L'output du système technologique, dont le but est idéalement de produire le plus grand nombre possible de ce composant, à un coût de revient le plus bas possible avec une atteinte à l'environnement la plus basse possible, aussi bien lors de sa fabrication et son démantèlement que lors de son fonctionnement,
2. Le composant de base d'un système énergétique, dont le but est la transformation d'une certaine quantité d'énergie d'un ou de plusieurs types de données en énergie valorisable, à un coût le plus bas possible avec une atteinte à l'environnement la plus basse possible aussi bien lors de sa fabrication que lors de son fonctionnement. Ce composant est en général accompagné pour son fonctionnement d'autres composants, issus eux-mêmes d'un système technologique.

Prenons l'exemple d'une éolienne produisant de l'électricité : elle est issue de toute la technologie « éolienne », soit l'ensemble des savoirs liés, des entreprises et organisations attachées, des ressources humaines et financières drainées … Cet objet « éolienne » est ensuite incluse dans un système de production électrique, dont elle va devenir un des composants. Elle est donc au croisement des 2 systèmes et aussi de 2 marchés (cf. Figure 23 ci-dessous) :

- Le marché de la technologie ;
- Le marché de l'énergie.

On peut généraliser pour tous les transformateurs, par exemple l'éclairage (« ampoule » à basse consommation, comme les Led). Le développement de la technologie est totalement couplé au développement de l'énergie produite et valorisée. Les succès montrent qu'il faut à la fois accélérer le développement du système technologique (« technology push », principalement innovation technique) et activer le marché de l'énergie « verte » (« market pull », innovation économique et organisationnelle).

Le transformateur lui-même en tant qu'appareil a un fonctionnement propre qui va varier aussi bien :

- De façon intrinsèque selon la qualité et la maturité du système technologique ;
- De façon subie selon les conditions de fonctionnement imposé par le système énergétique dont il est un des composants, que ce soit du côté des inputs, des outputs ou des autres composants (fonctionnement en usage).

Ainsi, l'évaluation d'un transformateur doit toujours se faire respectivement selon ces deux axes :

1. Son fonctionnement intrinsèque, soumis à des conditions d'usages standardisées,
2. Les pratiques réelles qui fixent les conditions d'usage et donc le fonctionnement du système énergétique incluant le transformateur.

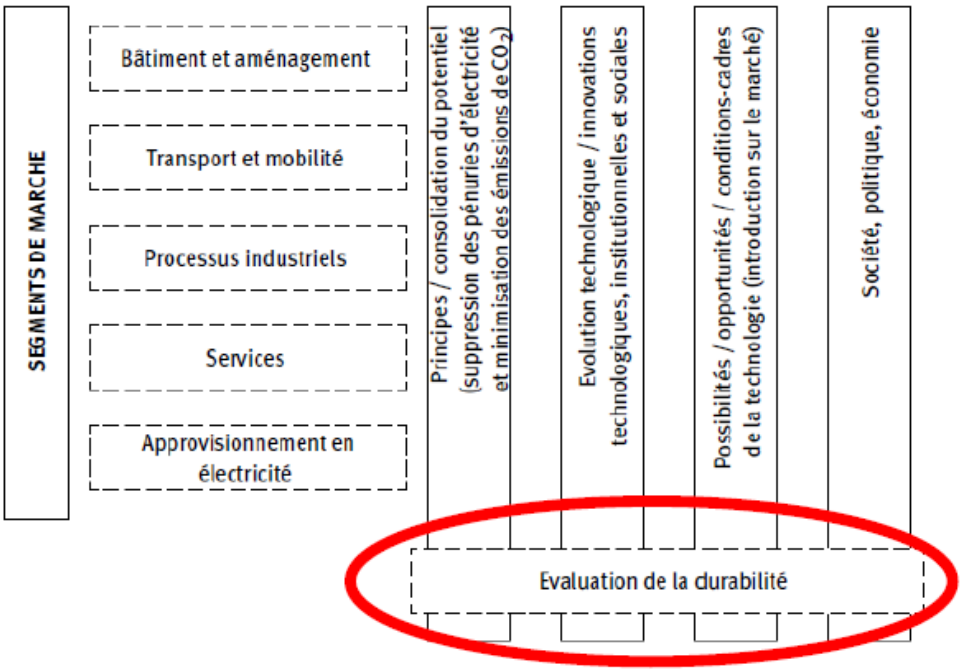
Autrement dit, un transformateur médiocre travaillant dans de bonnes conditions peut avoir une meilleure performance qu'un excellent transformateur travaillant dans de mauvaises conditions.

*Figure 23 : S*ystème énergétique et système technologique

Légende : rouge = système énergétique ; bleu = système technologique
Source : experts consultés par la Cour

ANNEXE III : EXEMPLE D'UN PROJET DE RECHERCHE DEMANDANT UNE ACV

Figure 24 : Dimensions d'analyse dans les chaînes de valeur



Source : *FNS*

Domaine intersectoriel « Evaluation de la durabilité » [45] :

« *L'évaluation de la durabilité des technologies ou des mesures politiques peut s'appuyer sur des méthodes déjà existantes telles que les analyses de cycle de vie (ACV), les évaluations des conséquences des choix technologiques (TA, de l'anglais « technology assessment ») ou encore l'évaluation de la durabilité (EDD) et l'analyse des risques. De plus, c'est en Suisse que se trouve la plus grande banque de données environnementales au monde (Centre ecoinvent). Elle contient des informations quantitatives sur les utilisations de ressources et les émissions des technologies de production d'énergie les plus diverses, sur les mix électriques de différents pays et régions, sur les chaînes de valeur de combustibles, de systèmes de transport pour l'énergie et la chaleur, de procédés de production de chaleur et d'autres systèmes de transport. D'autres projets internationaux complètent cette source de données avec des informations sur les technologies énergétiques de pointe du futur.*

Avec le domaine intersectoriel « Evaluation de la durabilité », il ne s'agit pas de développer de nouveaux modèles et méthodes théoriques, mais d'appliquer concrètement, et tout au plus d'adapter ou d'améliorer des modèles et des méthodes déjà existants. ***On attend que pour chaque projet conjoint, la contribution des résultats obtenus le long d'une chaîne de valeur soit dans la mesure du possible évaluée quantitativement à l'aune du développement durable. Le domaine intersectoriel « Evaluation de la durabilité» est donc impératif et il est au cœur de chaque projet conjoint.*** ».

[45] Source : FNS, Virage énergétique : Programme national de recherche PNR 70 : Mise au concours, pp 18-19, Berne, juillet 2013

ANNEXE IV : STATISTIQUE SUISSE PRODUCTION D'ÉLECTRICITÉ

Elektrizitätserzeugung
Production d'électricité

Tabelle 24
Tableau 24

Jahr / Année	Wasserkraftwerke: Laufwerke	Wasserkraftwerke: Speicherwerke	Wasserkraftwerke: Total		Kernkraftwerke		Konventionell-thermische Kraft- und Fernheizkraftwerke[1]: Total		Konventionell-thermische Kraft- und Fernheizkraftwerke[1]: Davon erneuerbar[2]		Diverse erneuerbare Energien[3]: Feuerungen mit Holz und Holzanteilen	Diverse erneuerbare Energien[3]: Biogasanlagen	Diverse erneuerbare Energien[3]: Photovoltaikanlagen	Diverse erneuerbare Energien[3]: Windenergieanlagen	Diverse erneuerbare Energien[3]: Total		Landeserzeugung (brutto) 100% / Production nationale (brute) 100%	Verbrauch der Speicherpumpen / Pompage d'accumulation	Nettoerz. (Speicherpumpen abgezogen) / Production nette (pompage déduit)
	Centrales hydrauliques: Centrales au fil de l'eau	Centrales hydrauliques: Centrales à accumulation	Centrales hydrauliques: Total		Centrales nucléaires		Centrales thermiques class. et centrales chaleur-force[1]: Total		Centrales thermiques class. et centrales chaleur-force[1]: Dont renouvelable[2]		Energies renouvelables diverses[3]: Chauffages au bois et en partie au bois	Energies renouvelables diverses[3]: Installations au biogaz	Energies renouvelables diverses[3]: Installations photovoltaïques	Energies renouvelables diverses[3]: Eoliennes	Energies renouvelables diverses[3]: Total				
	GWh	GWh	GWh	%	GWh	%	GWh	%	GWh	%	GWh	GWh	GWh	GWh	GWh	%	GWh	GWh	GWh
1970	13 758	17 515	31 273	89,6	1 850	5,3	1 763	5,1	–	–	–	–	–	–	–	–	34 886	965	33 921
1975	14 039	19 935	33 974	79,0	7 391	17,2	1 629	3,8	–	–	–	–	–	–	–	–	42 994	1 198	41 796
1979	14 803	17 542	32 345	71,0	11 243	24,7	1 963	4,3	–	–	–	–	–	–	–	–	45 551	1 586	43 965
1980	14 967	18 575	33 542	69,6	13 663	28,4	957	2,0	–	–	–	–	–	–	–	–	48 162	1 531	46 631
1981	16 173	19 924	36 097	70,0	14 462	28,1	956	1,9	–	–	–	–	–	–	–	–	51 515	1 395	50 120
1982	15 617	21 418	37 035	70,8	14 276	27,3	974	1,9	–	–	–	–	–	–	–	–	52 285	1 532	50 753
1983	15 234	20 768	36 002	69,5	14 821	28,6	996	1,9	–	–	–	–	–	–	–	–	51 819	1 346	50 473
1984	14 051	16 821	30 872	62,8	17 396	35,4	884	1,8	–	–	–	–	–	–	–	–	49 152	1 444	47 708
1985	13 765	18 912	32 677	59,6	21 281	38,8	869	1,6	–	–	–	–	–	–	–	–	54 827	1 364	53 463
1986	14 013	19 576	33 589	60,1	21 303	38,1	988	1,8	–	–	–	–	–	–	–	–	55 880	1 461	54 419
1987	14 863	20 549	35 412	60,9	21 701	37,3	1 048	1,8	–	–	–	–	–	–	–	–	58 161	1 564	56 597
1988	15 437	21 002	36 439	61,8	21 502	36,5	1 023	1,7	–	–	–	–	–	–	–	–	58 964	1 445	57 519
1989	13 613	16 872	30 485	57,4	21 543	40,6	1 082	2,0	–	–	–	–	–	–	–	–	53 110	1 454	51 656
1990	13 561	17 114	30 675	56,8	22 298	41,2	1 013	1,9	352	0,7	6	80	1	0	88	0,2	54 074	1 695	52 379
1991	13 898	19 184	33 082	59,0	21 654	38,6	1 247	2,2	343	0,6	6	87	2	0	95	0,2	56 078	1 946	54 132
1992	15 219	18 506	33 725	58,8	22 121	38,6	1 393	2,4	379	0,7	11	95	3	0	109	0,2	57 348	1 438	55 910
1993	15 451	20 802	36 253	61,2	22 029	37,1	913	1,5	377	0,6	8	106	4	0	118	0,2	59 313	1 186	58 127
1994	16 590	22 966	39 556	62,1	22 984	36,1	988	1,6	423	0,7	10	117	5	0	133	0,2	63 661	1 271	62 390
1995	16 148	19 449	35 597	59,0	23 486	38,9	1 137	1,9	443	0,7	9	122	6	0	138	0,2	60 358	1 520	58 838
1996	13 669	16 029	29 698	53,9	23 719	43,0	1 556	2,8	474	0,9	14	126	7	1	147	0,3	55 120	1 754	53 366
1997	14 695	20 099	34 794	57,4	23 971	39,6	1 686	2,8	519	0,9	10	129	7	2	149	0,2	60 600	1 519	59 081
1998	14 966	19 329	34 295	56,3	24 368	40,0	2 124	3,5	539	0,9	13	137	8	3	161	0,3	60 948	1 620	59 328
1999	16 640	23 976	40 616	60,9	23 523	35,3	2 386	3,6	594	0,9	13	142	10	3	168	0,3	66 693	1 408	65 285
2000	17 566	20 285	37 851	57,9	24 949	38,2	2 372	3,6	670	1,0	14	149	11	3	176	0,3	65 348	1 974	63 374
2001	17 751	24 510	42 261	60,3	25 293	36,0	2 433	3,5	705	1,0	14	157	13	4	187	0,3	70 174	1 947	68 227
2002	17 625	18 888	36 513	56,2	25 692	39,5	2 612	4,0	735	1,1	22	152	15	5	194	0,3	65 011	2 418	62 593
2003	15 398	21 047	36 445	55,9	25 931	39,7	2 689	4,1	752	1,2	27	151	18	5	201	0,3	65 266	2 893	62 373
2004	16 039	19 078	35 117	55,3	25 432	40,0	2 776	4,4	797	1,3	29	144	18	6	198	0,3	63 523	2 433	61 090
2005	14 998	17 761	32 759	56,6	22 020	38,0	2 932	5,1	838	1,4	33	145	21	8	207	0,4	57 918	2 631	55 287
2006	15 819	16 738	32 557	52,4	26 244	42,2	3 103	5,0	937	1,5	44	154	24	15	237	0,4	62 141	2 720	59 421
2007	16 547	19 826	36 373	55,2	26 344	40,0	2 894	4,4	919	1,4	92	168	29	16	305	0,5	65 916	2 104	63 812
2008	16 686	20 873	37 559	56,1	26 132	39,0	2 913	4,3	921	1,4	131	177	37	19	363	0,5	66 967	2 685	64 282
2009	16 110	21 026	37 136	55,8	26 119	39,3	2 817	4,2	884	1,3	154	191	54	23	422	0,6	66 494	2 523	63 971
2010	16 030	21 420	37 450	56,5	25 205	38,1	3 123	4,7	928	1,4	135	209	94	37	474	0,7	66 252	2 494	63 758
2011	14 733	19 062	33 795	53,7	25 560	40,7	2 866	4,6	963	1,5	193	229	168	70	660	1,0	62 881	2 466	60 415
2012	17 832	22 074	39 906	58,7	24 345	35,8	2 869	4,2	1 015	1,5	252	260	299	88	899	1,3	68 019	2 411	65 608
2013	17 759	21 813	39 572	57,9	24 871	36,4	2 721	4,0	1 050	1,5	278	280	500	90	1 148	1,7	68 312	2 132	66 180
2014	17 243	22 065	39 308	56,5	26 370	37,9	2 448	3,5	1 108	1,6	273	291	842	101	1 507	2,2	69 633	2 355	67 278
2015	16 595	22 891	39 486	59,9	22 095	33,5	2 660	4,0	1 115	1,7	184	303	1 119	110	1 716	2,6	65 957	2 296	63 661

[1] Die «Therm. Stromprod. gem. Elektrizitätsstatistik» im Anhang A.1c der Publikation «Thermische Stromproduktion inklusive Wärmekraftkopplung (WKK) in der Schweiz» des BFE beinhaltet zusätzlich die Feuerungen mit Holz und Holzanteilen sowie die Biogasanlagen.
[2] aus Kehrichtverbrennungsanlagen und erneuerbaren Abfällen; 1990 erstmals erfasst
[3] 1990 erstmals erfasst

Quelle: Schweiz. Elektrizitätsstatistik und Statistik der erneuerbaren Energien des BFE

[1] La production d'électricité thermique selon la statistique de l'électricité («Therm. Stromprod. gem. Elektrizitätsstatistik») mentionnée à l'annexe A.1c de la publication de l'OFEN intitulée «Thermische Stromproduktion inklusive Wärmekraftkopplung (WKK) in der Schweiz» (Production d'électricité thermique, y compris le couplage chaleur-force (CCF) en Suisse) comprend en plus les chauffages au bois et en partie au bois ainsi que les installations à biogaz.
[2] provenant d'usines d'incinération des ordures ménagères et les déchets renouvelables; relevés dès 1990
[3] relevés dès 1990

Source: Statistique suisse de l'électricité et statistique des énergies renouvelables de l'OFEN

COUR DES COMPTES CANTON DE VAUD

LA COUR DES COMPTES EN BREF

La Cour des comptes du Canton de Vaud est une Autorité indépendante qui a pour mission de contrôler l'utilisation de tout argent public, sous l'angle de la performance en s'assurant principalement du respect des principes d'économie, d'efficacité, d'efficience et de durabilité, et subsidiairement du respect des principes de légalité et de régularité (art. 2 LCComptes).

Les **attributions** de la Cour sont les suivantes (art. 4 LCComptes) :

- vérification de la bonne utilisation des fonds des entités soumises à son champ de contrôle ;
- vérification de l'évaluation de la gestion des risques des entités soumises à son champ de contrôle ;
- contrôle des subventions accordées par l'Etat ou les communes.

La Cour **se saisit elle-même** des objets qu'elle entend traiter à l'exception des mandats spéciaux que le Grand Conseil et le Conseil d'Etat peuvent lui attribuer (art. 21 et ss LCComptes). Quiconque peut également proposer un mandat spécial à la Cour qui peut y donner suite ou non.

Le champ de contrôle de la Cour s'étend aux entités suivantes (art. 3 LCComptes):

- le Grand Conseil et son Secrétariat général ;
- le Conseil d'Etat et son administration ainsi que les entités qui lui sont rattachées ;
- le Tribunal cantonal ainsi que les tribunaux et autres offices qui lui sont rattachés ;
- les communes, ainsi que les ententes, associations, fédérations et agglomérations de communes ;
- les personnes morales de droit public ;
- les personnes physiques et morales auxquelles l'Etat ou une commune délègue l'exécution d'une tâche publique ou accorde, directement ou indirectement, une subvention au sens des articles 7 et 12 de la loi sur les subventions ou une autre contribution au sens de l'article 8, alinéa 1, lettres a,c,d,f,g de la loi sur les subventions.

Les rapports de la Cour consignent ses constatations et recommandations (art. 36 LCComptes). Ils comprennent également les remarques de l'entité auditée, les éventuelles remarques subséquentes de la Cour et, le cas échéant, les avis minoritaires de la Cour.

La Cour **publie ses rapports** pour autant qu'aucun intérêt prépondérant, public ou privé, ne s'y oppose. Ils sont consultables sur le site internet de la Cour : www.vd.ch/cdc.

Vous pouvez apporter votre contribution au bon usage de l'argent public en contactant la Cour des comptes. Toute personne peut communiquer à la Cour des signalements en rapport avec des faits entrant dans ses attributions. Il suffit de vous adresser à :

Cour des comptes du Canton de Vaud
Rue de Langallerie 11, 1014 Lausanne
Téléphone : +41 (0) 21 316 58 00
Courriel : info.cour-des-comptes@vd.ch