



Schweizerische Eidgenossenschaft  
Confédération suisse  
Confederazione Svizzera  
Confederaziun svizra

Département fédéral de l'environnement, des transports,  
de l'énergie et de la communication DETEC

Office fédéral de l'énergie OFEN

Rapport final, 17 avril 2012

---

# Management Energétique Urbain - MEU

Outils innovants pour la planification et le  
management de systèmes énergétiques en  
zones urbaines

---



LA CHAUX/DE/FONDS  
MÉTROPOLE HORLOGÈRE  
UHRENMETROPOLE  
METROPOLI OROLOGIERA  
WATCHMAKING METROPOLIS



**Mandant:**

Office fédéral de l'énergie OFEN  
Programme de recherche Pompes à chaleur, CCF, froid  
CH-3003 Berne  
[www.bfe.admin.ch](http://www.bfe.admin.ch)

**Cofinancement:**

- Fonds de recherche, de développement et de promotion de l'industrie gazière suisse (FOGA), c/o SVGW, CH-8603 Schwerzenbach
- Ville de La Chaux-de-Fonds
- Ville de Lausanne
- Ville de Martigny
- Ville de Neuchâtel

**Mandataire:**

EPFL Energy Center  
En communauté de recherche avec CREM et HES-SO Valais  
Station 5 – En Bassenges  
1015 Lausanne  
<http://energycenter.epfl.ch>

**Auteurs:**

Massimiliano Capezzali, EPFL Energy Center, [massimiliano.capezzali@epfl.ch](mailto:massimiliano.capezzali@epfl.ch)  
Gaëtan Cherix, CREM, [gaetan.cherix@crem.ch](mailto:gaetan.cherix@crem.ch)  
Diane Perez, EPFL LESO-PB, [diane.perez@epfl.ch](mailto:diane.perez@epfl.ch)  
Jakob Rager, EPFL LENI, [jakob.rager@epfl.ch](mailto:jakob.rager@epfl.ch)  
Alain Duc, HES-SO Valais, [alain.duc@hevs.ch](mailto:alain.duc@hevs.ch)  
Mélanie Guittet, EPFL Energy Center, [melanie.guittet@epfl.ch](mailto:melanie.guittet@epfl.ch)

**Responsable de domaine de l'OFEN:** Andreas Eckmanns

**Chef de programme de l'OFEN:** Thomas Kopp

**Numéro du contrat et du projet de l'OFEN:** SI/500136-01

**Numéro de contrat et du projet de la FOGA :** 204

**Responsables FOGA :** Martin Seifert, Nicolas Houlmann, Félix Güdemann et Charles-Frédéric Gnaegi

Les auteurs de ce rapport portent la responsabilité de son contenu et de ses conclusions.

# Table des matières

<b>Résumé.....</b>	<b>7</b>
<b>Introduction et but du travail .....</b>	<b>9</b>
1. Introduction.....	9
2. Rappel des objectifs .....	9
3. Organisation du projet .....	11
3.1 Déroulement du projet.....	11
3.2 Organisation <i>bottom-up</i> .....	12
3.3 Intervenants .....	12
3.4 Communication et dissémination .....	14
<b>I. Workpackage 1 – Modèle de données et cadre réglementaire .....</b>	<b>16</b>
1. Etat des lieux .....	16
1.1 Revue des données pertinentes disponibles.....	16
1.2 Amélioration des connaissances de terrain au travers de l'analyse et de l'élargissement des banques de données existantes .....	18
1.3 Contact approfondi avec les stakeholders des villes .....	19
2. Analyse du cadre réglementaire .....	19
2.1 Loi sur le CO <sub>2</sub> , LApEI, LEnE - et les ordonnances associées -, Politique Energétique Nationale (PEN), MoPECs, règlements communaux .....	20
2.2 Identification des contraintes et opportunités pour les villes et les producteurs indépendants .....	28
3. Mise en application de l'analyse du cadre légal .....	30
4. Modèle de données .....	32
4.1 Mise en adéquation des modèles de données existants, en collaboration avec le groupe de travail .....	32
4.2 Développement et validation d'une structuration unifiée et flexible des informations .....	34
4.3 Temporalité .....	36
4.4 Scénarios .....	37
4.5 Valeurs par défaut.....	38

4.6	La base de données.....	39
4.7	Fonctions.....	39
4.8	Vues.....	40
4.9	Implémentation du cadre structurel et réglementaire dans le modèle de données .....	40
<b>II. Workpackage 2 – Méthodologie générale, algorithmes et modèles numériques.....</b>		<b>42</b>
1.	Revue des méthodes existantes et compatibilité avec les objectifs MEU .....	42
1.1	CitySim.....	42
1.2	EnerGIS / Osmose .....	42
2.	Cahier des charges.....	43
2.1	Approche cartographique .....	43
2.2	Menus d'accès .....	44
2.3	Métadonnées .....	44
2.4	Echange et structuration de données; création du modèle de base.....	44
2.5	Etat des lieux énergétique d'une zone urbaine .....	46
2.6	Modélisation des technologies .....	47
2.7	Création, caractérisation de scénarios .....	47
2.8	Calculs basés sur les scénarios - Bilans globaux et détaillés.....	48
2.9	Suivi des performances.....	48
2.10	Données input.....	48
2.11	Indicateurs (données output).....	50
3.	Adaptation et intégration des méthodes existantes pour répondre aux demandes du cahier des charges MEU.....	51
3.1	Solveur CitySim.....	51
3.2	E-Tech - Modélisations disponibles des technologies de conversion.....	51
3.3	Développement du webservice MEU (orchestration des services) .....	52
3.4	Modélisations des réseaux et gestion des puissances.....	55
<b>III. Workpackage 3 - Développement d'un outil d'aide à la décision .....</b>		<b>57</b>
1.	Construction de la plate-forme informatique.....	57
1.1	Architecture système.....	57
1.2	Elaboration des spécifications de requis et de design.....	59

2. Présentation de la plate-forme .....	61
2.1 Accueil.....	61
2.2 Informations d'un bâtiment.....	63
2.3 Scénarios .....	69
2.4 Calcul et résultats.....	71
<b>IV. Résultats - Projets urbains .....</b>	<b>75</b>
1. Introduction générale .....	75
2. Liste des projets urbains .....	75
3. Aperçu des résultats principaux.....	77
3.1 La Chaux-de-Fonds .....	77
3.2 Lausanne .....	78
3.3 Martigny .....	80
3.4 Neuchâtel.....	82
<b>V. Évaluations du projet 2011 et perspectives pour le futur (2012).....</b>	<b>84</b>
1. Rapport financier .....	84
2. Ressources humaines financées par le biais du projet MEU.....	84
3. Perspectives pour la plate-forme MEU en 2012 et au-delà .....	85
<b>VI. Annexe .....</b>	<b>87</b>
A. Valeurs par défaut .....	87
A.1 Modèles de technologie.....	87
A.2 Ressources et données de bilan .....	89
A.3 Réseaux par défaut .....	90
A.4 Types de mur.....	91
A.5 Systèmes énergétiques par défaut.....	94
A.6 Fraction des services fournis par les systèmes énergétiques.....	95
A.7 Valeurs par défaut selon la catégorie d'ouvrage.....	95
A.8 Types de murs par défaut.....	96
B. Modèles de technologie .....	97
B.1 Chaudière.....	97

B.2 Poêle .....	97
B.3 Echangeur de chaleur.....	97
B.4 Couplage chaleur-force .....	97
B.5 Pompe à chaleur .....	98
B.6 Solaire PV.....	98
B.7 Solaire thermique .....	98
C. Modèle d'analyse du cycle de vie .....	99

## Résumé

Le projet MEU a été lancé par l'Energy Center de l'Ecole Polytechnique Fédérale de Lausanne (EPFL), le Centre de Recherches Energétiques et Municipales de Martigny (CREM), en collaboration avec la Haute Ecole Spécialisée de Suisse Occidentale – Valais (HES-SO Valais). Il a été soutenu financièrement par l'Office Fédéral de l'Energie (OFEN), le Fonds de recherche, de développement et de promotion de l'industrie gazière suisse (FOGA) et quatre villes-partenaires en Suisse Romande, à savoir La Chaux-de-Fonds, Lausanne, Martigny et Neuchâtel. Le projet s'est déroulé sur trois ans, avec l'implication de plusieurs laboratoires de l'EPFL et de la HES-SO Valais, dans une collaboration continue et *bottom-up* avec les partenaires du projet, notamment les services concernés des villes-partenaires et les entreprises multi-énergies locales (Services Industriels de Lausanne, Sinergy SA et Viteos SA).

Les trois objectifs stratégiques prioritaires du projet MEU sont :

- développer une méthodologie visant à intégrer les aspects de demande et d'approvisionnement énergétique au niveau de la planification de zones urbaines;
- fédérer les outils existants au sein d'une plate-forme informatique ;
- réaliser un outil informatique qui corresponde aux besoins des villes et entreprises multi-énergies partenaires, tout en tenant compte de leurs processus décisionnels internes et de leurs réalités opérationnelles.

La méthodologie intégrée développée dans le cadre du projet MEU a été traduite au sein d'un outil d'aide à la décision, qui est utilisable directement par les délégués à l'énergie des villes et par les ingénieurs des entreprises multi-énergies partenaires. Cette plate-forme informatique sera accessible depuis tout navigateur web et propose un environnement de travail cartographique et GIS, dans une approche centrée le long de trois axes :

- l'établissement de l'état des lieux énergétique de zones urbaines, avec possibilité d'effectuer un suivi temporel des indicateurs énergétiques pertinents;
- la construction et l'évaluation de scénarios énergétiques, agissant tant sur la demande que sur l'approvisionnement, sur la base de l'état des lieux;
- une base de données en mesure de traduire la complexité des systèmes énergétiques urbains, tout en offrant les fonctionnalités nécessaires en termes de géo-référencement et gestion de la temporalité.

## Abstract

The MEU project has been launched by the Energy Center at the Ecole Polytechnique Fédérale de Lausanne (EPFL), the Energy and Municipal Research Center in Martigny (CREM), in collaboration with the University of Applied Sciences of Western Switzerland - Wallis (HES-SO Valais). It has been funded by the Swiss Federal Office of Energy (SFOE), the Research, Development and Promotion Fund of the Swiss gas industry (FOGA) and four cities in the French-speaking part of Switzerland, namely La Chaux-de-Fonds, Lausanne, Martigny and Neuchâtel. The project lasted three years, involved several EPFL and HES-SO Valais laboratories, with a continuing and bottom-up-style collaboration with the other project partners, in particular the concerned municipal services and the local multi-energy utilities (Services Industriels de Lausanne, Sinergy SA and Viteos SA).

The three priorities and strategic objectives of the MEU project are:

- develop a methodology towards integrating both the energy demand and supply aspects at the level of energy planning of urban zones;
- federate existing tools within a software platform;
- build a software tool which corresponds to the needs of partner cities and multi-energy utilities, while taking into account internal decisional processes and operational realities.

The integrated methodology developed within the MEU project has been implemented in a decision-support tool, which is directly usable by municipal energy services, as well as multi-energy utilities engineers. This software platform will be accessible from any web browser and operates in a GIS-enabled cartographic environment, in an approach along three axes:

- establishing the present energy configuration of urban zones, with the possibility to perform temporal follow-up of the relevant energy indicators;
- building and evaluating energy scenarios, acting on both energy supply and demand, on the basis of the present energy configuration;
- a database able to take into account the complexity of urban energy systems, while offering broad functions in terms of geo-referencing and time-evolution management.



# Introduction et but du travail

## 1. Introduction

Le projet MEU s'adresse aux villes dans le but de créer un outil d'aide à la décision qui puisse les accompagner dans leurs choix de planification énergétique et dans le suivi des performances énergétiques de leur territoire – par exemple dans l'optique de réaliser des objectifs du type 3x20. Dans le même esprit, les entreprises multi-énergies locales pourront bénéficier de la plate-forme MEU qui leur permet d'interagir avec les autorités politiques et avec leurs clients, tout en leur donnant la possibilité de planifier leurs actions sur le territoire et de quantifier des scénarios en termes de choix de technologies et de vecteurs énergétiques.

Du point de vue méthodologique, l'un des objectifs principaux du projet MEU est celui de fédérer les modèles et les logiciels existants en termes de management et de planification énergétique au niveau urbain. L'outil informatique fait donc appel à des solveurs existants – pour la demande et, respectivement, les systèmes d'approvisionnement énergétiques -, qui ont été développés à l'EPFL et testés dans le cadre du projet MEU. Parallèlement, une base de données géo-référencée a été développée, permettant de gérer la complexité de la réalité énergétique d'une zone urbaine. Ainsi, l'outil se base sur une approche cartographique et interactive, facilitant la prise en main par les futurs utilisateurs.

Les aspects réglementaires des politiques énergétiques territoriales ont été aussi étudiés et intégrés dans la plate-forme MEU.

A la fin du projet MEU, un premier prototype de la plate-forme informatique MEU est mis à disposition des quatre villes-partenaires, ainsi que des entreprises multi-énergies travaillant sur leurs territoires respectifs. La plate-forme offre ainsi la possibilité de calculer et de représenter graphiquement au travers de cartes thématiques et de tableaux de données agrégées une importante série d'indicateurs énergétiques et environnementaux, permettant ainsi aux délégués à l'énergie des villes et aux ingénieurs des entreprises multi-distributrices d'énergie de réaliser des planifications territoriales détaillées à différentes échelles spatiales.

## 2. Rappel des objectifs

Selon la définition contractuelle du projet MEU, les divers développements réalisés dans le cadre du projet trouvent une concrétisation au sein d'un outil informatique d'aide à la décision, reposant sur un modèle de données unifié et structuré, apte à délivrer des indicateurs de performances énergétiques pertinents. Les informations fournies par la plate-forme informatique MEU doivent permettre :

- de fournir du support aux planificateurs énergétiques urbains, notamment les délégués à l'énergie et les ingénieurs des entreprises multi-énergies locales, tant pour la qualification et le suivi des performances que pour la réalisation d'avant-projets de rénovation ou de construction de zones urbaines;
- de définir les implications de nouveaux outils réglementaires à disposition des acteurs du territoire urbain, tant sur les processus décisionnels que sur les bâtiments et le design des systèmes d'approvisionnement énergétique dans les villes;

- d'évaluer les forces, faiblesses et opportunités du marché pour les différents vecteurs énergétiques actuels et futurs, ainsi que les technologies qui leur sont associées.

L'outil d'aide à la décision MEU se basera sur une méthodologie intégrée de planification et de management des systèmes énergétiques en zones urbaines, qui soit en mesure de tenir compte de tous les moyens d'action applicables sur le territoire, soit :

- construction, assainissement énergétique et rénovation des bâtiments;
- utilisation accrue des ressources locales et des rejets thermiques (p.ex. industriels);
- synergies entre les différentes technologies d'approvisionnement énergétique;
- développement des réseaux d'énergies et des solutions de stockage (de chaleur notamment);
- synergies entre consommateurs;
- suivi de l'approvisionnement énergétique, ainsi que des consommations;
- implémentation de nouveaux outils réglementaires (lois, subventions, etc.), à tous les niveaux, i.e. international, national, cantonal et communal.

La plate-forme informatique MEU doit donc permettre l'élaboration, la caractérisation, l'évaluation et la comparaison de différents scénarios énergétiques mixtes, i.e. impliquant tant des éléments caractérisant la demande en énergie que des options d'approvisionnement énergétique et leurs interactions. Ces scénarios sont définis et introduits directement par les utilisateurs; ils sont ensuite évalués sur la base d'indicateurs et sous un certain nombre de contraintes, également choisis par les utilisateurs. Il est important de souligner que l'outil MEU ne fournit pas d'optimisation de l'approvisionnement et de la consommation énergétiques d'une zone urbaine : sur la base de l'état des lieux énergétique d'une telle zone, il permet de construire et de travailler avec des scénarios qui sont retenus réalisables/souhaitables/imaginables par les services municipaux et par les entreprises multi-énergies locales.

La plate-forme informatique MEU est un instrument de travail construit de manière *bottom-up*, soit en collaboration avec les experts des villes et les entreprises multi-énergies locales, qui en seront justement les futurs utilisateurs. Sur la base d'une dynamique de questionnement politique et/ou économique, voire stratégique, l'utilisateur pourra élaborer une série de scénarios dont le but est de répondre à des objectifs fixés. La comparaison entre ces scénarios puis, par exemple, l'approfondissement ultérieur de l'un de ceux-ci, permettra aux élus ou aux responsables des entreprises multi-énergie de prendre des décisions, pour l'élaboration d'un plan d'action, d'un avant-projet, voire l'édiction de règlements spécifiques. L'un des piliers de ce projet est donc celui de passer d'un fonctionnement dans lequel des rapports papier sont remis aux villes sur la base de leurs questions quant à la planification énergétique territoriale, à la réalisation d'un outil qui puisse directement être utilisé par les villes et les entreprises multi-énergies locales. Dans cet esprit, le software MEU est réalisé sur la base d'une plate-forme web, accessible à partir de n'importe quel navigateur internet, et dans un environnement cartographique interactif.

Dans le cadre de développements futurs, la plate-forme informatique MEU pourra être étendue à une gestion plus détaillée des réseaux multi-énergies (dimensionnement), à l'impact énergétique de la mobilité urbaine et à des options de visualisation plus avancées. Ces éléments ne font pour l'instant pas partie de l'outil MEU, mais seront étudiés dans le cadre du futur projet MEU +.

### 3. Organisation du projet

#### 3.1 Déroutement du projet

Le projet MEU a officiellement commencé au mois d'octobre 2008 et s'est déroulé jusqu'à la fin de l'année 2011. L'équipe de recherche a concrètement été constituée au début de l'année 2009, après la mise en place de la structure opérationnelle du projet (voir 3.3 - Intervenants) et l'engagement des doctorants auprès des laboratoires EPFL impliqués (voir Tableau 3 - Doctorants et superviseurs de thèse impliqués dans le projet MEU).

Du point de vue organisationnel, la première année a été dédiée avant tout à la construction des collaborations et des interfaces de communication entre les villes-partenaires et les institutions de recherche. En parallèle, les premiers travaux scientifiques ont été engagés, notamment par la détermination de l'état de l'art en termes de méthodes de planification énergétique urbaine et d'analyse des logiciels existants. Par ailleurs, un large travail de réflexion au sujet des données effectivement disponibles et à utiliser pour une planification énergétique territoriale efficace a donc été lancé, notamment au travers de plusieurs réunions impliquant tous les partenaires. Enfin, une méthode d'analyse permettant d'évaluer quels sont les outils structurels à disposition des collectivités publiques et comment ces derniers sont utilisés dans les projets de planification énergétique a été élaborée.

La deuxième année s'est concentrée le long de quatre axes principaux, à savoir :

- rédaction et validation par tous les partenaires du cahier des charges fonctionnel de la plate-forme MEU, y inclus priorisation (voir Cahier des charges, p. 43);
- mise en place du groupe de travail technique voué à la réalisation informatique de la plate-forme MEU.
- élaboration détaillée, consolidation et implémentation informatique en PostgreSQL d'un modèle de données unifié et structuré, compatible avec les solveurs et avec les données à disposition des villes;
- définition de l'architecture informatique, notamment du point de vue de l'interaction entre les modules (orchestration des services).

La deuxième année a permis de consolider l'une des particularités fondamentales de l'outil informatique MEU, à savoir l'idée de travailler sur la base de scénarios qui seront développés, mis à jour, complétés et enrichis par les utilisateurs mêmes, sur la base de l'état des lieux énergétiques des zones urbaines considérées.

La troisième année a été principalement consacrée au développement informatique de la plate-forme informatique MEU, notamment du point de vue de :

- la consolidation de la base de données et des fonctions d'appel;
- la réalisation de l'interface utilisateur de la plate-forme;
- l'intégration des différents modules de l'architecture informatique;
- la construction de use-cases menant aux spécifications des fonctionnalités;

Ainsi, à la fin de la troisième année, ces travaux ont permis de réaliser un premier prototype de la plate-forme MEU, qui est maintenant disponible et accessible à partir de n'importe quel navigateur internet. Il inclut les fonctionnalités prioritairement souhaitées par les partenaires du projet – y inclus les fonctionnalités GIS fournies par l'environnement ArcGIS –, dans une approche cartographique interactive. La plate-forme permet de considérer les situations les plus complexes du point de vue des services énergétiques présents dans une zone urbaine et de réaliser un suivi détaillé des performances énergétiques, par le biais d'indicateurs.

### 3.2 Organisation *bottom-up*

L'une des particularités du projet MEU a été donnée par une organisation impliquant directement des villes et des entreprises multi-énergie, non seulement au niveau de la supervision du projet, mais également au niveau opérationnel (voir Tableau 1 et Tableau 2). En effet, l'un des buts du projet était celui de réaliser un outil qui réponde directement aux besoins des villes et qui soit utilisable par leurs services. Cette construction *bottom-up* a directement et notamment amené vers l'idée de travailler dans un environnement cartographique, sur la base de scénarios et, autant que faire se peut, avec des données de consommation réelles et mesurées. A notre connaissance, une telle approche est totalement innovante et n'a jamais été réalisée auparavant.

Dans le même esprit, trois projets urbains ont été réalisés au sein de chacune des quatre villes-partenaires (un par année), avec une forte implication des multi-distributeurs énergétiques locaux. Ces 12 projets ont notamment permis d'interagir directement avec les villes, de mieux appréhender les processus de décision et de cerner précisément la réalité du terrain, notamment du point de vue des données et de contraintes. Les projets urbains sont présentés en détail dans le Chapitre IV.

### 3.3 Intervenants

Le projet MEU a été rédigé et proposé par l'Energy Center de l'EPFL et par le Centre de Recherches Energétiques et Municipales de Martigny (CREM). Afin de le réaliser, l'EPFL et le CREM ont formé une communauté de recherche avec la HES-SO Valais.

Le projet a été financé, d'une part, par l'Office Fédéral de l'énergie (OFEN, Programme « Couplage chaleur-force, froid et chaleur ») et par le Fonds de recherche, de développement et de promotion de l'industrie gazière suisse (FOGA).

D'autre part, les Villes de La Chaux-de-Fonds, Lausanne, Martigny et Neuchâtel ont également participé au financement du projet à hauteur égale. Elles ont, en outre, mis à disposition leurs délégués à l'énergie – voire d'autres collaborateurs - pour la participation aux réunions du Groupe de travail établi contractuellement (voir Tableau 1 - Membres du Groupe de travail MEU hors membres de la communauté de recherche) et pour la supervision des étudiant(e)s impliqués dans les projets urbains.

Le FOGA a délégué l'entreprise multi-énergie Viteos SA pour le représenter au sein du Groupe de travail et pour intervenir dans les projets urbains des deux villes du Canton de Neuchâtel. De même, un représentant de l'entreprise ESRI Suisse SA a participé aux réunions du Groupe de travail, dès la deuxième moitié de l'année 2010.

Composition du Groupe de travail MEU	
<b>Entité partenaire</b>	Représentant au sein du Groupe de travail
<b>Ville de La Chaux-de-Fonds</b>	Maurice Grünig
<b>Ville de Lausanne</b>	Georges Ohana et Ulrick Liman
<b>Ville de Martigny</b>	Jonathan Carron (Sinergy SA)
<b>Ville de Neuchâtel</b>	Christian Trachsel
<b>Industrie gazière</b>	Charles-Frédéric Gnaegi (Viteos SA)
<b>ESRI Suisse SA</b>	Fabio Oliosi

Tableau 1 - Membres du Groupe de travail MEU hors membres de la communauté de recherche

Le groupe de travail s'est réuni à six reprises, dans chacune des villes-partenaires et à l'EPFL. Tous les documents des séances sont à disposition des partenaires, ainsi que de l'OFEN et du FOGA sur l'intranet MEU.

Selon le contrat du projet, un Groupe d'accompagnement a également été constitué, avec des représentants des institutions constituant la communauté de recherche, afin d'accompagner la direction du projet. Le Groupe d'accompagnement s'est réuni à une occasion à l'EPFL, soit le 18 janvier 2010. La réunion prévue en 2011 a été remplacé par des rencontres bilatérales, pour des raisons de conflits d'agendas. Les membres du Groupe d'accompagnement sont donnés dans le Tableau 2.

<b>Composition du Groupe d'accompagnement MEU</b>	
<b>Entité</b>	<b>Représentant au sein du Groupe d'accompagnement</b>
<b>OFEN</b>	Thomas Kopp
<b>FOGA</b>	Félix Güdemann et Nicolas Houlmann
<b>Ville de La Chaux-de-Fonds</b>	Laurent Kurth
<b>Ville de Lausanne</b>	Jean-Yves Pidoux
<b>Ville de Martigny</b>	Marc-Henri Favre et René Quiros
<b>Ville de Neuchâtel</b>	Olivier Arni
<b>Novatlantis</b>	Roland Stulz
<b>Association Ecoparc</b>	Anne-Claude Cosandey

Tableau 2 - Membres du Groupe d'accompagnement du projet MEU

Les directeurs des laboratoires EPFL impliqués, ainsi que le Directeur du CREM et le Prof. Michel Bonvin de la HES-SO Valais ont également participé à l'unique séance du Groupe d'accompagnement. L'association Ecoparc a participé sur demande des Villes de La Chaux-de-Fonds et Neuchâtel. Les documents des séances sont à disposition des partenaires, de l'OFEN et de la FOGA sur l'intranet MEU.

Le projet a été dirigé par l'Energy Center de l'EPFL, sous la direction du Prof. Hans Björn Püttgen et avec son adjoint, Massimiliano Capezzali en tant que chef de projet. Outre l'Energy Center, trois laboratoires EPFL ont activement participé au projet, notamment par la supervision de doctorants (voir Tableau 3) et d'étudiant(e)s Master impliqués dans les projets urbains : le Laboratoire d'énergétique industrielle (LENI), dirigé par le Prof. Daniel Favrat, le Laboratoire d'énergie solaire et de physique du bâtiment (LESO-PB), dirigé par le Prof. Jean-Louis Scartezzini et la Chaire de management des industries de réseau (MIR), dirigée par le Prof. Matthias Finger. Pour l'instant, aucune des thèses engagées totalement ou partiellement dans le cadre du projet MEU n'a été déposée : celle de Luc Girardin le sera au début de l'année 2012 et celle de Diane Perez, tout à la fin de l'année 2012. La fin de la thèse de Jakob Rager est prévue pour la mi-2013. Gaëtan Cherix a décidé de ne pas poursuivre sa thèse en été 2010.

<b>Doctorants impliqués dans le projet MEU</b>		
<b>Laboratoire</b>	<b>Superviseur</b>	<b>Doctorant(e,s)</b>
<b>LENI</b>	François Maréchal	Luc Girardin et Jakob Rager
<b>LESO-PB</b>	Darren Robinson, Jérôme Kämpf et Jean-Louis Scartezzini	Diane Perez
<b>MIR</b>	Matthias Finger	Gaëtan Cherix

Tableau 3 - Doctorants et superviseurs de thèse impliqués dans le projet MEU

Le CREM a participé très activement au projet, notamment par le biais de son Directeur Gaëtan Cherix, qui avait la responsabilité de coordonner les travaux du Groupe de travail, ainsi que le développement informatique de la plate-forme MEU. Gaëtan Cherix a également

supervisé les étudiants qui ont réalisé les projets urbains auprès du CREM. Plusieurs collaborateurs du CREM ont donné des contributions ponctuelles durant le projet, sur la base de leurs expertises spécifiques.

La HES-SO Valais a été impliquée dans le projet MEU à deux niveaux distincts. D'une part, l'unité Power & Control de l'Institut des Systèmes Industriels, par le biais du Prof. Michel Bonvin a participé à la supervision des étudiant(e)s de Master impliqués dans les projets urbains. Il a également activement pris part à toutes les réunions du Groupe de travail et a représenté la direction de la HES-SO Valais au sein du Groupe d'accompagnement. D'autre part, l'Institut d'Informatique de Gestion (IIG) de la HES-SO Valais a été impliqué dans le développement informatique de la plate-forme MEU, dès la deuxième moitié de l'année 2010. Le Prof. Jean-Pierre Rey de l'IIG a ainsi mis Alain Duc à disposition du projet, en tant qu'ingénieur de développement, en charge notamment de la réalisation de l'interface de la plate-forme MEU. Tous deux ont participé aux deux dernières réunions du Groupe de travail MEU.

A partir de la deuxième moitié de l'année 2010, la société ESRI Suisse SA a conclu un accord avec la direction du projet MEU et a été associée à la réalisation du logiciel : cet accord a permis à l'équipe de projet de pouvoir compter sur l'expertise de l'une des entreprises leader mondiales dans le domaine des systèmes d'informations géographiques (SIG) au niveau mondial.

### 3.4 Communication et dissémination

Dès l'année 2009, un site internet sur le projet MEU a été mis en ligne, à l'adresse URL <http://meu.epfl.ch>. Ce site contient non seulement un descriptif du projet ainsi que les articles publiés dans le cadre du projet (scientifiques et grand public), mais également les liens vers tous les partenaires du projet. Il contient aussi une partie protégée par mot de passe (intranet) qui permet aux partenaires du projet de partager tous les documents pertinents (working papers, procès-verbaux des séances, présentations, rapports, thèses etc.).

Les thèses qui émaneront du projet MEU seront publiques et représenteront donc un vecteur de dissémination très important, notamment du point de vue des approches méthodologiques et algorithmiques, au-delà de la Suisse francophone.

Par ailleurs, le projet MEU a été présenté à plusieurs reprises à des audiences spécialisées ou au grand public, comme le montre le Tableau 4 ci-dessous :

<b>Présentations du projet MEU</b>		
<b>Evènement</b>	<b>Date</b>	<b>Personne</b>
<b>Journée Romande de l'énergie</b>	29/9/2009	Massimiliano Capezzali
<b>Journée de la Technique - Swissengineering</b>	10/11/2009	Massimiliano Capezzali
<b>Club Ravel – AES/VSE</b>	1/12/2009	Massimiliano Capezzali et Gaëtan Cherix
<b>Symposium EIFER - L'efficacité énergétique du quartier à la région</b>	3/12/2009	Massimiliano Capezzali
<b>Forum sur l'énergie et la géopolitique de Nice</b>	4/12/2009	Gaëtan Cherix
<b>Séminaire des gaziers romands</b>	24/1/2011	Massimiliano Capezzali et Gaëtan Cherix
<b>Bauforum - Novatlantis</b>	7/7/2011	Massimiliano Capezzali
<b>ESRI France - SIG 2011</b>	6/10/2011	Massimiliano Capezzali

Tableau 4 - Présentations extérieures du projet MEU

La méthodologie et les résultats du projet MEU ont été présentés dans la presse spécialisée, ainsi que dans des revues scientifiques ou des actes de congrès.

- G. CHERIX, M. CAPEZZALI, A. CHAPUIS, H. B. PÜTTGEN, et M. FINGER  
**Action and influence of the multiple decision levels over the whole energy chain Dubrovnik Conference on sustainable development of Energy, Water and Environment Systems**, Dubrovnik (2009)
- A. CHAPUIS, G. CHERIX, M. CAPEZZALI, H.B. PÜTTGEN et M. FINGER  
**A Conceptual Framework for Energy Planning and CO<sub>2</sub> Emission Counting in Urban Areas**, Conference proceedings of «INFRADAY 2010», Berlin (2010).
- D. PEREZ, J. KÄMPF, M. CAPEZZALI, G. CHERIX, J. RAGER, D. ROBINSON  
**Energy-Related Data Management Solutions for Municipalities**, working paper (2011)
- gwa, 10/2011, Interview de Massimiliano Capezzali sur le projet MEU
- D. PEREZ, D. ROBINSON  
**Urban Energy Flow Modelling: A Data-Aware Approach**, to be published in: S. Müller Arisona et al. (Eds.): DUMS, CCIS 242, pp. 206--226. Springer, Heidelberg (2012)

Des articles sont également parus dans la presse généraliste, notamment dans *L'Impartial*, *La Liberté* et *Le Temps* en 2009. Enfin, MEU a été présenté dans l'émission de RSR La Première « Biosphère », le 11 janvier 2010, par le chef de projet.

# I. Workpackage 1 – Modèle de données et cadre réglementaire

## 1. Etat des lieux

### 1.1 Revue des données pertinentes disponibles

Lors de la réalisation d'un projet de planification énergétique en zone urbaine, le premier pas consiste à déterminer et à analyser les consommations actuelles, afin d'établir un état des lieux, ou le point de départ. Dans un premier temps, il faut ainsi disposer d'informations relatives aux bâtiments et à leur usage. Ces données permettront, d'une part, de constituer une base cartographique et, d'autre part, elles seront utiles pour modéliser les besoins énergétiques des bâtiments pour lesquels nous ne disposons pas de mesures des consommations. Dans un premier temps, les données structurelles qui doivent être récoltées sont les suivantes :

- Plan cadastral du quartier (données SIG 2D, voire 3D)
- Surfaces de référence énergétique
- Dates de construction / rénovation
- Affectations des bâtiments
- Vecteur(s) énergétique(s) pour le chauffage
- Vecteur(s) énergétique(s) pour l'eau chaude sanitaire (ECS)

Ces données sont généralement à disposition auprès des services de l'urbanisme des communes suisses. Elles proviennent, pour la majorité des bâtiments, du Registre des Bâtiments et des Logements (RegBL), géré par l'Office Fédéral de la Statistique. Le RegBL recense tous les bâtiments suisses d'affectation résidentielle. C'est une source de données précieuse pour le projet MEU puisqu'elle contient beaucoup d'informations utiles à la planification énergétique : numéro d'identification, adresse, agent énergétique pour le chauffage et l'ECS, nombre d'étages, dates de construction, de rénovation, etc.

Ensuite, le calcul des performances et l'élaboration de scénarios requiert un nombre de données beaucoup plus important, mais dont le type et la nature dépendent fortement des scénarios et de la granularité des résultats qui seront calculés.

Concernant la provenance de ces données, une majorité des informations nécessaires à l'élaboration d'un projet de planification énergétique territoriale sont en principe disponibles auprès du/des fournisseur(s) d'énergie locaux. En effet, pour des raisons évidentes de facturation, ces derniers comptabilisent les quantités d'énergies consommées de tous les bâtiments pour l'électricité et de tous les bâtiments raccordés pour les énergies de réseau. De plus, les distributeurs de gaz naturel / biogaz et de chaleur à distance sont les acteurs qui maîtrisent les plans de réseaux et, par conséquent, les zones d'influence des différentes énergies de réseau. Enfin, ces derniers sont responsables de la fourniture d'électricité, soit aussi des contrats d'approvisionnement.

La collecte des informations concernant les consommations de mazout s'avère généralement plus difficile, vu la non-centralisation des données (une collecte spécifique est à faire auprès de chacune des gérances immobilières et des propriétaires). Plusieurs



méthodes d'évaluation des consommations ont été testées (capacité des citernes, puissances installées), mais n'ont à ce jour pas permis de définir un modèle suffisamment valide pour être utilisé.

La meilleure méthode de caractérisation des bâtiments dont les consommations d'énergie ne sont pas documentées semble ainsi d'être de calculer les besoins thermiques, à partir d'une modélisation aussi simple que possible des bâtiments évalués, puis d'appliquer à cette demande un rendement standard d'installation afin d'estimer les consommations.

Les statistiques réalisées sur les besoins thermiques modélisés pour des bâtiments résidentiels, comparés aux valeurs de consommation mesurées, montrent clairement qu'un modèle d'estimation simplifié, basé sur les affectations, les dates de construction et le climat local n'est pas applicable lorsque l'on souhaite travailler à l'échelle du bâtiment.

Bâtiments, infrastructures	Bâtiments, consommations	Bâtiments, équipements	Ressources
<b>Positionnement, orientation et distance entre bâtiments</b>	<b>Consommations annuelles de gaz, mazout, chaleur à distance, biomasse, électricité</b>	<b>Technologie de production de chauffage</b>	<b>Energies de réseau à disposition</b>
<b>Hauteur / nombre d'étages</b>	Consommations mensuelles de gaz, mazout, chaleur à distance, biomasse, électricité	<b>Technologie de production d'eau chaude sanitaire (ECS)</b>	<b>Profils de températures extérieures</b>
Surface de l'enveloppe / Surface vitrée	Profil de consommation horaire de chaleur, d'électricité, de froid	Puissance des équipements installés	<b>Irradiation solaire</b>
Coefficients d'échange thermiques ( $U_{\text{parois}}$ , $U_{\text{vitrage}}$ , etc.)	Températures extérieures de non-chauffage / de refroidissement	Rendements des technologies installées	Chaleur de l'environnement
Etanchéité, systèmes de ventilation		<b>Marquage de l'électricité</b>	Eaux usées
Demande de chaleur / de refroidissement		<b>Marquage de la chaleur à distance</b>	Biomasse
Température extérieure de non chauffage / de refroidissement		Niveaux de température du réseau de chaleur à distance	Rejets thermiques
Température extérieure de dimensionnement		Niveaux de température des systèmes de distribution de chaleur	
Température intérieure de dimensionnement			
Classement patrimoine historique			
<b>Nombre d'habitants / usagers</b>			

Tableau 5 - Données nécessaires (en gras)/utiles pour la réalisation d'un projet de planification énergétique territoriale

Cette méthode de classement, très utilisée dans le domaine de l'énergétique du bâtiment, est sans doute valable à l'échelle d'une ville entière, c'est-à-dire qu'elle permet d'évaluer la consommation totale d'un groupe de 500 bâtiments avec une erreur relativement faible. Cependant, dans le cas du projet MEU, l'objectif est d'estimer les besoins de chaque bâtiment pour lequel on ne dispose pas de relevé des consommations. La précision requise est donc beaucoup plus élevée et il est apparu qu'il est inutile d'appliquer une valeur moyenne de consommation à un bâtiment tout en sachant que la vraie valeur se situe, au mieux probablement, à plus ou moins 50% de l'estimation.

Dans le courant du projet, il est ainsi apparu comme première conclusion importante que l'estimation des consommations du quartier à partir de données statistiques simplifiées ne permet pas d'atteindre la granularité souhaitée pour ce projet. Des travaux complémentaires ont ainsi été lancés, notamment par la HES-SO Valais, pour déterminer quels sont les paramètres qui influencent majoritairement les consommations énergétiques des bâtiments.

Comme deuxième conclusion, les travaux ont montré que l'utilisation du RegBL de l'Office Fédéral de la Statistique (OFS), couplé aux données disponibles auprès des villes et des multi-distributeurs permet de structurer idéalement les données et de produire un premier état des lieux cartographié des consommations énergétiques d'un territoire.

## **1.2 Amélioration des connaissances de terrain au travers de l'analyse et de l'élargissement des banques de données existantes**

Notamment dans le cadre des collaborations avec les villes de Neuchâtel et de La Chaux-de-Fonds, un travail tel que détaillé ci-dessus a été effectué quant à la récolte des données et du traitement de celles-ci, afin de créer des modèles utilisables par les logiciels de simulation. Les différentes sources de données ont généralement chacune leur utilité spécifique et sont souvent auto-suffisantes. Dès lors, leur utilisation et combinaison pose différents problèmes, qui ont été résolus manuellement pour l'instant.

Les différentes étapes du travail effectué dans ce domaine peuvent se résumer ainsi :

1. Acquisition des données dans les multiples sources disponibles (cadastre, OFS, etc.).
2. Structuration des données dans un logiciel permettant d'importer des données de formats hétéroclites, une mise en forme préalable pouvant être nécessaire.
3. Adaptation aux différents degrés de détail et échelles des données, choix de l'unité du modèle et assemblage des données sur cette base. Cette étape est extrêmement chronophage et devra être automatisée au maximum.
4. Consolidation des données : la qualité parfois médiocre des données nécessite des corrections tout au long du processus. Même si une semi-automatisation des vérifications peut être prévue pour cette étape également, l'expertise des personnes travaillant sur le terrain est indispensable à ce niveau.
5. Utilisation de la structure de données ainsi créé pour exporter les inputs nécessaires aux solveurs intégrés au sein de la plate-forme et utilisation de ceux-ci.

Ainsi, les nombreux travaux effectués sur la récolte et la mise en forme de ces données, de même que l'identification des données en input nécessaires pour utiliser les outils de simulation existants ont permis de développer les bases du modèle de données, décrit ci-dessous.

### **1.3 Contact approfondi avec les stakeholders des villes**

Au travers de la mise en place du groupe de travail, il a été possible de procéder à l'établissement d'un catalogue des priorités et objectifs, ainsi que d'une revue des données disponibles sur les systèmes énergétiques urbains existants et futurs.

L'une des premières décisions adoptée par le groupe de travail a été celui de considérer les données de consommation énergétique mesurées – par exemple sur base annuelle – comme l'élément le plus important. Il s'agit donc de mettre en place tous les efforts possibles afin d'obtenir ces données quant au chauffage, à l'ECS et à l'électricité et de devoir recourir à des données obtenues par le biais de méthodes statistiques ou de modèles de physique du bâtiment seulement dans le cas où les données réelles n'ont pas pu être relevées.

Comme deuxième élément structurant, le groupe de travail a choisi d'utiliser les plans numérisés des cadastres communaux comme base de travail cartographique. En effet, le cadastre numérisé permet d'obtenir une base vectorielle précise et à jour des bâtiments concernés, ainsi que leur forme, leur situation géographique, les numéros de parcelles, les adresses et potentiellement les numéros EGID. En sus, le RegBL fournit des informations de base quant à l'âge des bâtiments, leur affectation, leurs systèmes énergétiques, etc. Ces données devront être complétées par l'utilisateur lorsqu'elles sont manquantes et contrôlées du point de vue de leur pertinence quant aux bâtiments.

Enfin, le groupe de travail a clairement mis l'accent sur la nécessité de travailler sur la base de scénarios énergétiques mixtes – i.e. qui considèrent tant la demande que l'approvisionnement énergétique d'une zone urbaine – qui puissent être entièrement construits par les utilisateurs. Ainsi, la plate-forme MEU n'offre pas de fonctionnalités d'optimisation dans le sens strict du terme, car il est reconnu que les solutions ainsi obtenues ne sont guère implémentables, notamment au sein de zones urbaines déjà construites de manière dense.

## **2. Analyse du cadre réglementaire**

En mars 2007, tous les Etats membres de l'Union Européenne ont repris à l'échelle nationale les objectifs dits des 3x20, de manière à atteindre les buts de la politique énergie climat de l'UE : diminuer de 20% les émissions de gaz à effet de serre, augmenter de 20% l'efficacité énergétique et avoir au moins 20% d'énergie renouvelable dans le bouquet énergétique (chaleur, électricité, etc.), d'ici à 2020 et à l'échelle du territoire.

Quant à la Suisse, ses objectifs spécifiques sont triples : diminuer de 1.5% par an les consommations d'énergies fossiles par rapport à celles de l'année 2000, stabiliser la consommation d'électricité au niveau de 2006 et augmenter de 50% la part des énergies renouvelables par rapport à la consommation d'énergie globale.

Le cadre légal, c'est-à-dire les différents outils structurels mis en place par chacun des niveaux de gouvernance, a pour objectif de mettre en œuvre une politique énergétique globale, à l'échelle d'un territoire.

Dans cette optique, deux tâches ont été réalisées :

- Déterminer quels sont les outils structurels (légaux et réglementaires) qui ont une influence directe sur les performances des systèmes énergétiques urbains.
- Définir l'impact de ces outils sur la chaîne énergétique (de l'énergie primaire aux services énergétiques) qui caractérise un système énergétique urbain.

## **2.1 Loi sur le CO<sub>2</sub>, LApEI, LEnE - et les ordonnances associées -, Politique Energétique Nationale (PEN), MoPECs, règlements communaux**

En Suisse, il existe principalement cinq niveaux décisionnels qui peuvent impacter les performances énergétiques d'une zone urbaine : les accords internationaux, la Confédération, les cantons, les municipalités et les personnes (physiques et morales).

### *2.1.1 La politique internationale*

La politique énergétique internationale de la Suisse a trois objectifs principaux :

- Assurer la sécurité d'approvisionnement
- Garantir un prix compétitif de l'énergie pour l'économie et les ménages
- Promouvoir une utilisation efficace et durable de l'énergie.

L'outil principal de la Confédération helvétique en lien avec la politique internationale est le protocole de Kyoto, mis en place par la Conférence des Nations-Unies sur les Changements Climatiques (CNUCC) (1998). Ce protocole définit un cadre légal pour la protection du climat avec des objectifs de réduction des émissions de gaz à effet de serre (GES) pour les pays signataires « industrialisés ».

Trois mécanismes de flexibilité ont été élaborés pour atteindre ces objectifs. Il s'agit de mécanismes économiques et financiers dont le but est de permettre de réaliser des projets de diminution des émissions de CO<sub>2</sub> là où ces derniers sont considérés comme les plus rentables.

Chaque pays signataire du protocole reçoit un nombre défini de quotas d'émissions correspondant aux objectifs fixés. Ces quotas d'émission peuvent ensuite être échangés sur un marché international, appelé "*cap and trade system*". Les deux autres mécanismes de flexibilité permettent aux pays de financer des projets de protection du climat à l'étranger, tant dans des pays industrialisés que dans les pays en développement. En accord avec le protocole de Kyoto, la Suisse doit diminuer ses émissions de GES de 8% entre 2008 et 2012, par rapport aux émissions de 1990.

Le protocole de Kyoto arrivant à terme à la fin d'année 2012, de nombreuses négociations ont été entreprises ces dernières années pour définir un nouveau protocole, fixant des objectifs climatiques pour la période suivante. Les dernières négociations des pays membres de la CNUCC se sont tenues dans le cadre de la conférence de Durban en 2011, un accord permettant de fixer des objectifs tangibles reconnus par la majorité des Etats n'a pas encore été trouvé.

## Cas particulier de l'Europe

Il n'existe pas d'accord spécifique en matière de politique énergétique entre la Suisse et l'Union européenne. Cependant, un accord de libre-échange a été conclu, en vue de permettre le commerce de l'énergie et des technologies énergétiques entre les deux parties.

Néanmoins, la politique énergétique étrangère de l'Union européenne est essentielle pour la Suisse. Même si la Suisse ne fait pas partie de l'Union européenne, elle constitue un acteur clef et incontournable sur le marché énergétique européen. La Suisse est une plaque tournante pour les marchés du gaz et de l'électricité. Simultanément, le pays dépend de ses voisins pour son approvisionnement en matière de gaz, pétrole et électricité.

La Suisse peut ainsi retirer des avantages de la politique énergétique européenne et de ses efforts de développement. Cependant, elle est aussi indirectement soumise aux directives européennes, si elle veut préserver sa position sur le marché énergétique.

Finalement, les municipalités suisses peuvent participer à des programmes européens tels que la Convention des Maires (voir Tableau 6). Cette initiative de la Commission européenne encourage les villes européennes à combattre le changement climatique en mettant en œuvre des politiques énergétiques à la fois locales et durables. Les signataires s'engagent à atteindre sur leur territoire les objectifs fixés dans le paquet "Energie pour un monde en mutation", c'est-à-dire la réduction de 20% de leurs émissions de CO<sub>2</sub> d'ici 2020, en diminuant leur consommation de combustibles fossiles de 20% et en accroissant la part des ressources renouvelables à hauteur de 20% dans le mix (ou bouquet) énergétique. Des mesures potentielles devraient être également prises en comptes dans tous les secteurs (public et privé) et dans tous les domaines : environnement construit et nouvelles constructions, infrastructures municipales, ressources renouvelables locales, planification urbaine, mobilité, etc.

	Instruments/Règlements	Base légale	Objectifs
International	Protocole de Kyoto	CNUCC	Réduire de 8% l'ensemble des émissions de GES entre 2008 et 2012 (comparé au niveau de 1990)
	Charte de l'Energie		Elaboration conjointe de directives de politique énergétique durable
	Convention des Maires	Commission européenne	Réduire au moins de 20% les GES en augmentant la part des énergies renouvelables à hauteur de 20% et réduire la consommation de combustibles fossiles de 20%

Tableau 6 - Liste des instruments et règlements au niveau international

### 2.1.2 Confédération Suisse

Les autorités suisses fixent le cadre général pour le développement énergétique national, afin d'assurer la sécurité d'approvisionnement énergétique et mener le pays vers un développement énergétique durable. Ceci est mis en œuvre grâce à différentes lois dont les objectifs principaux sont la réduction de la consommation de combustibles fossiles et d'émissions de CO<sub>2</sub>, le développement de l'efficacité énergétique, la limitation des

consommations d'électricité, le maintien de l'utilisation de l'hydroélectricité et finalement la promotion de l'utilisation de la récupération de chaleur et de ressources renouvelables.

Les bases légales sont principalement composées par la loi sur le CO<sub>2</sub>, la loi sur l'énergie (LEne), la loi sur l'approvisionnement en électricité (LApEL) et leurs ordonnances de mise en œuvre (voir Tableau 7). La loi fournit un cadre pour la mise en œuvre de plusieurs instruments comme la taxe sur le CO<sub>2</sub>, la rémunération à prix coûtant pour l'électricité renouvelable, l'obligation d'indiquer les performances énergétiques des appareils et des véhicules au moyen d'étiquettes énergie, etc.

	Instruments / règlements	Base légale	Objectifs
<b>Confédération</b>	Rétribution à prix coûtant du courant injecté (RPC)	LApEI	5400GWh d'électricité renouvelable d'ici 2030
	Taxe sur le CO <sub>2</sub>	Loi sur le CO <sub>2</sub>	Objectif du Protocole de Kyoto: - 8% de GES d'ici 2012 (comparé au niveau de 1990)
	Centime climatique	Loi sur le CO <sub>2</sub>	Compenser les émissions de GES provoquées par la mobilité en finançant des projets de protection climatique en Suisse et à l'étranger
	Programme bâtiment	Loi sur le CO <sub>2</sub>	Cofinancer l'assainissement des bâtiments sur le plan énergétique Encourager les énergies renouvelables, la récupération des rejets de chaleur et l'amélioration d'installations techniques
	Exigences et marquage des appareils et moteurs	LEne + OEn	Stabilisation de la consommation domestique d'énergie et incitation
	<b>Financements et mesures d'encouragement</b>		
	- Contribution globale pour les cantons	LEne + OEn	Aider les cantons à mettre en œuvre leurs programmes d'incitation
	- Installations pilotes et de démonstration	LEne + OEn	Promouvoir les activités de recherche et de développement concernant les technologies énergétiques
- Programme de Suisse Energie pour les communes		Augmentation de 20% de l'efficacité énergétique, 20% de moins de CO <sub>2</sub> et au total 20% de nouvelles sources d'énergie renouvelables (40% pour le chauffage et l'eau chaude, 10% pour l'électricité et 5% pour la mobilité).	

Tableau 7 - Liste des instruments/règlements au niveau national

### LEne

La LEne de 1998 définit les principes généraux à appliquer, afin d'assurer un approvisionnement énergétique adéquat : diversifié, fiable, rentable et compatible avec les questions de protection climatique. Des directives précises présentent la manière dont les individus et les entreprises devraient se comporter par rapport aux questions de conversion et d'utilisation de l'énergie. De surcroît, cette loi promeut l'utilisation rationnelle et économique de l'énergie, l'efficacité énergétique et le recours aux ressources renouvelables locales. Elle spécifie également les différents objectifs relatifs à la consommation d'énergie, la production d'énergie renouvelable, etc.

Les autorités suisses peuvent imposer des minima de niveaux de performance énergétique sur les appareils, les importations et la fabrication de véhicules. La LENE stipule que la Confédération suisse promeut l'information, le conseil et les programmes de formation et R&D sur les questions de technologies énergétiques, d'économies d'énergie et de mesures de récupération de chaleur. Ces différentes activités sont menées en étroite coopération avec les cantons, par le biais de différentes campagnes de promotion et de financement. L'exemple principal est le programme Suisse Energie pour les communes, qui vise à aider les municipalités à mettre en œuvre les directives de la LENE.

### LApEI.

La LApEI définit les règlements spécifiques se rapportant au développement du secteur de l'électricité, notamment quant à la libéralisation du marché de l'électricité en Suisse. Elle permet d'assurer un approvisionnement électrique d'une grande fiabilité à travers le pays, à un prix garantissant une bonne compétitivité du secteur économique suisse et selon les principes du développement durable. L'ordonnance relative à cette loi (OApEI) détermine les règlements détaillés d'application de la LApEI. Par exemple, l'OApEI introduit l'instrument de « rémunération à prix coûtant » (RPC) des productions d'électricité renouvelable, qui vise à augmenter la part d'électricité renouvelable dans le bouquet électrique suisse.

### Loi sur le CO<sub>2</sub>.

La Suisse dispose d'une loi sur le CO<sub>2</sub> basée sur des instruments tant volontaires que contraignants. C'est un facteur pour assurer une efficacité. La loi inclut un programme de commerce d'émissions qui encourage les entreprises à investir dans les économies d'énergie et les technologies renouvelables et les oblige à se conformer à leurs objectifs d'émissions. La politique énergétique se focalise sur la réduction de la consommation de combustibles fossiles : les émissions CO<sub>2</sub> provenant de sources fossiles doivent être réduites de 10% par rapport à leur niveau de 1990 (équivalent à 8% de l'ensemble des émissions de GES). Chaque achat de combustible se rapportant à de l'énergie fossile, excluant le transport du combustible, est soumis à la taxe sur le CO<sub>2</sub>, aussi bien pour les personnes physiques que morales. Les bénéfices de cette taxe sont redistribués à la population par le biais des assurances-maladie et aux entreprises par le biais de fonds de pensions. De plus, depuis 2010, un tiers de ces bénéfices sert à financer le Programme Bâtiments de la Confédération (au maximum CHF 200 millions). Les entreprises émettant de larges quantités de CO<sub>2</sub> peuvent être exemptées du paiement de la taxe. En guise de compensation, l'entreprise prend un engagement contraignant sur la réduction de ses émissions.

### Programme Bâtiments

En 2009, le Parlement a décidé de consacrer un tiers de la taxe sur le CO<sub>2</sub> prélevée sur les combustibles et au maximum 200 millions de francs par année à la réduction des émissions de CO<sub>2</sub> dans le secteur du bâtiment. Cette décision a permis à la Confédération et aux cantons de lancer le Programme Bâtiments au début de l'année 2010. Prévu sur une durée de 10 ans, il vise une réduction des émissions annuelles de CO<sub>2</sub> de 1,5 à 2,2 millions de tonnes dans le domaine du bâtiment d'ici à 2020.

Le Programme Bâtiments comporte deux volets: le volet A, commun à toute la Suisse, porte sur l'assainissement énergétique de l'enveloppe des bâtiments, c.-à-d. sur une meilleure isolation des toits, murs, sols, plafonds et fenêtres. Le volet B comprend des programmes spécifiques à chaque canton et destinés à encourager le recours aux énergies renouvelables, la récupération de chaleur et l'amélioration des installations techniques des

bâtiments. Cofinancés par les contributions globales de la Confédération, les programmes cantonaux existent le plus souvent déjà depuis plusieurs années.

Le Programme Bâtiments est financé par les recettes de la taxe sur le CO<sub>2</sub> et par les contributions cantonales. En tout, 280 à 300 millions de francs sont à la disposition des deux volets chaque année.<sup>1</sup>

### 2.1.3 Les cantons

Dans le domaine de l'énergie, comme défini par la Constitution suisse et la LENE, les cantons ont la compétence de mesurer et contraindre les performances énergétiques des bâtiments. Ils doivent inscrire dans leur législation cantonale un cadre légal promouvant l'efficacité énergétique et l'utilisation d'énergie renouvelable pour les bâtiments. Différents autres éléments de politique énergétique, notamment quant à l'approvisionnement en énergie, la planification énergétique territoriale, l'utilisation des ressources, etc. peuvent y être intégrés.

Afin d'harmoniser de la manière la plus efficace possible, les lois sur l'énergie des différents cantons, la Confédération suisse et la Conférence des directeurs cantonaux de l'énergie (EnDK) décidèrent d'élaborer en 1992 un « Module de Prescriptions Energétiques des Cantons » (MoPEC). Ce module, révisé et actualisé deux fois depuis sa première version, est composé de huit modules de base ou optionnels. Les modules de base doivent être introduits dans chaque Loi Cantonale sur l'Énergie (LCEne). Les modules optionnels peuvent être introduits dans des lois cantonales spécifiques (dans ce cas, elles doivent correspondre aux modules du MoPEC). Ensuite, le MoPEC permet aux cantons de publier des lois sur l'énergie harmonisées aux huit modules considérés. Les cantons peuvent aussi implémenter d'autres articles spécifiques qui n'ont pas été rédigés dans le MoPEC (voir Tableau 8).

De plus, comme mentionné précédemment, la Confédération finance chaque année une contribution globale destinée à encourager des mesures auprès des cantons. Ils sont donc responsables d'allouer ces fonds par le biais de programmes spécifiques, avec au moins 50% des fonds alloués finançant des projets individuels.

---

<sup>1</sup> Source : Le programme Bâtiment en 2010, année de lancement du projet ; Rapport général de gestion



	Instruments / règlements	Base légale	Objectifs
<b>Cantons</b>	<b>Prescriptions énergétiques pour les bâtiments</b>		
	- Standards concernant l'enveloppe et la consommation des bâtiments	LEne, MoPEC	Promouvoir les mesures d'économie d'énergie dans les bâtiments
	- Part maximale d'énergie non-renouvelable dans la consommation de chaleur des bâtiments	Lene, MoPEC	Promouvoir l'énergie renouvelable locale
	- Exigences sur les équipements de conversion d'énergie	LEne, MoPEC	Augmenter l'efficacité énergétique des équipements des bâtiments
	- Certificat énergétique cantonal des bâtiments (CECB)	MoPEC	Augmenter la transparence du marché de la promotion immobilière et promouvoir la rénovation des bâtiments
	- Exigences spécifiques concernant les centrales électriques alimentées par des combustibles fossiles	LEne, LApEI, MoPEC	Evaluation obligatoire de la récupération de la chaleur perdue
	- Exigences sur les systèmes d'éclairage, de rafraîchissement et de ventilation	MoPEC	Promouvoir les mesures d'économie d'énergie dans les bâtiments
	- Contrôle des consommations d'énergie pour les nouveaux bâtiments		Monitoring (surveillance) des consommations d'énergie pour de grands bâtiments
	<b>Planification énergétique territoriale</b>		
	- Droit d'utilisation du sol plus dense pour des bâtiments efficaces énergétiquement suivant le MoPEC	MoPEC	Augmenter le nombre de bâtiments efficaces énergétiquement (labellisés)
	- Régulation de l'utilisation du sol pour des centrales à énergie renouvelables	LCene	Coordonner et optimiser l'utilisation du sol pour des centrales à énergies renouvelables
	<b>Subventions et mesures d'incitation</b>		
	- Economies d'énergie	MoPEC	Encourager l'efficacité énergétique
	- Energie renouvelable et récupération de chaleur	MoPEC	Encourager l'utilisation d'énergie renouvelable et la chaleur perdue
	- Information, conseil et marketing dans le domaine de l'énergie	MoPEC	Information, conseil et marketing dans le domaine de l'énergie, pour les professionnels et les individus
	- Labels d'efficacité énergétique pour les bâtiments		Encourager les mesures d'efficacité énergétique dans les bâtiments en attribuant des certificats de qualité

Tableau 8 - Liste des instruments/règlements au niveau cantonal

#### 2.1.4 Les municipalités

Globalement les municipalités suisses bénéficient de compétences étendues et d'une grande autonomie en matière d'utilisation du sol, des bâtiments et des règlements de construction, de gestion des ressources renouvelables locales et de bien plus dans d'autres domaines.

Dans cette étude, la politique énergétique a été considérée comme un lot de mesures ponctuelles décidées par les autorités locales, afin d'atteindre des objectifs spécifiques. Par exemple, la surveillance des grands bâtiments municipaux, qui visent à diminuer la consommation énergétique municipale et la facture énergétique, est une mesure de politique locale. Si une telle mesure est institutionnalisée et par la suite appliquée à tous les bâtiments municipaux, le gouvernement local devra mettre en vigueur une réglementation locale, qui doit être approuvée par le parlement local.

Cependant, en termes d'harmonisation, aucune base transparente n'existe comme des règlements standards pour les municipalités (au contraire du MoPEc des cantons). Les autorités suisses ont mis en œuvre une initiative pour améliorer les politiques d'énergie locales en utilisant les meilleures pratiques. Le programme Suisse Energie pour les communes a développé un label intitulé "Cité de l'énergie", qui se base sur le processus du European energy award © (eea ©). Cet instrument facilite la mise en œuvre de politiques énergétiques locales et transversales, utilisant une liste standard de plus de 350 mesures potentielles d'énergie durable.

Finalement, selon la LENE et le MoPEC, la planification énergétique est une compétence locale dans tous les cantons suisses, à l'exception du canton de Genève. Les municipalités ont les compétences pour mettre en application des plans directeurs (plan de l'énergie incluant les réseaux énergétiques, la disponibilité des ressources renouvelables, etc.), en coopération avec les distributeurs locaux d'énergie (voir Tableau 9).

Ces deux compétences spécifiques, la mise en application des politiques énergétiques locales et les compétences de planification énergétique fournissent aux autorités municipales un rôle essentiel en termes de planification et de gestion énergétique.

	Instruments / règlements	Base légale	Objectifs
<b>Municipalités</b>	<b>Utilisation du sol et planification énergétique territoriale</b>		
	- Plan directeur énergétique	MoPEC, Règlements communaux	Définir des zones spécifiques d'approvisionnement des réseaux d'énergie et des zones pour l'utilisation d'énergie renouvelable locale
	- Prescriptions énergétiques pour les bâtiments et contrôle (consommations maximales de chaleur et part de l'énergie non renouvelable, etc.)	MoPEC, Règlements communaux	Promouvoir des mesures d'économies d'énergie et l'utilisation d'énergie renouvelable
	- Connexion obligatoire des bâtiments aux réseaux de chauffage à distance alimenté par des énergies renouvelables	MoPEC, Règlements communaux	Augmenter l'efficacité économique du chauffage à distance, diminuer les émissions locales de CO <sub>2</sub> et la consommation d'énergie primaire pour le chauffage et l'eau chaude
	<b>Conception et suivi des bâtiments publics</b>		
	- Comptabilité énergétique et gestion de la consommation d'énergie	Politique locale	Surveiller les consommations d'énergie des bâtiments et réagir aux défauts (ou avaries) des installations
	- Plan de rénovation des bâtiments municipaux	Politique locale	Augmenter l'efficacité énergétique municipale et réduire la facture énergétique sur le long terme
	- Plan d'éclairage public	Politique locale	Augmenter l'efficacité énergétique municipale et réduire la facture énergétique
	<b>Approvisionnement en énergie</b>		
	- Production et distribution d'énergie renouvelable locale ou récupération de chaleur perdue (chauffage, électricité, etc.)	Politique locale	Promouvoir et augmenter l'utilisation d'énergie renouvelable
	- Intégration d'installations de grande efficacité (cogénération, chauffage à distance, etc.)	Politique locale	Promouvoir et augmenter l'efficacité énergétique de la ville
	- Taxes sur l'énergie non renouvelable	LApEI	Réduire les consommations d'énergie et financer des projets durables (RPC)
	<b>Subventions et mesures d'incitation</b>		
	- Economies d'énergie	Règlements communaux	Encourager l'efficacité énergétique
	- Énergie renouvelable et récupération de chaleur	Règlements communaux	Encourager l'utilisation d'énergie renouvelable et les déchets de chaleur
	- Information, conseil et marketing dans le domaine énergétique	Règlements communaux	Information, conseil et marketing dans le domaine énergétique
	- Labels d'efficacité énergétique pour les bâtiments	Règlements communaux	Encourager les mesures d'efficacité énergétique dans les bâtiments

Tableau 9 - Liste des instruments/règlements au niveau municipal

### 2.1.5 Personnes morales et physiques

Finalement, à l'échelon le plus bas, les individus peuvent largement influencer la consommation d'énergie à chaque étape de la chaîne énergétique, choix se référant à la rentabilité économique et à la sensibilité écologique. La première mesure efficace concerne les changements comportementaux pour éviter la surconsommation. Il y a beaucoup d'actions quotidiennes, qui peuvent déjà réduire de manière significative l'intensité des services énergétiques. Puis, viennent les choix effectués entre les différentes options d'approvisionnement énergétiques disponibles, comme les chaudières à gaz ou le chauffage à distance. Pour aller plus loin, il est toujours possible de réduire les consommations en investissant dans des solutions énergétiquement plus efficaces (enveloppes de bâtiments, équipement, appareils et véhicules plus efficaces). Ces mesures volontaires concernent bien sûr tant les personnes physiques que les sociétés privées ou publiques. Ceci est détaillé dans le Tableau 10 ci-dessous.

	Instruments / règlements	Objectifs
Individu	Comportement: éviter des surconsommations / gaspillage d'énergie	Réduire le service énergétique pour le consommateur final
	Choix d'une option pour l'approvisionnement énergétique	Réduire la consommation « d'énergie intermédiaire » par des choix judicieux d'agents énergétiques
	Isolation efficace des bâtiments	Réduire la demande de chaleur pour les bâtiments
	Appareils efficaces en énergie	Réduire la consommation d'électricité
	Equipements de conversion efficaces en énergie	Réduire la consommation d'énergie finale en investissant dans des équipements hautement efficaces (pompe à chaleur, ...)
	Production locale d'énergie renouvelable	Réduire la consommation d'énergie primaire en utilisant des ressources renouvelables locales

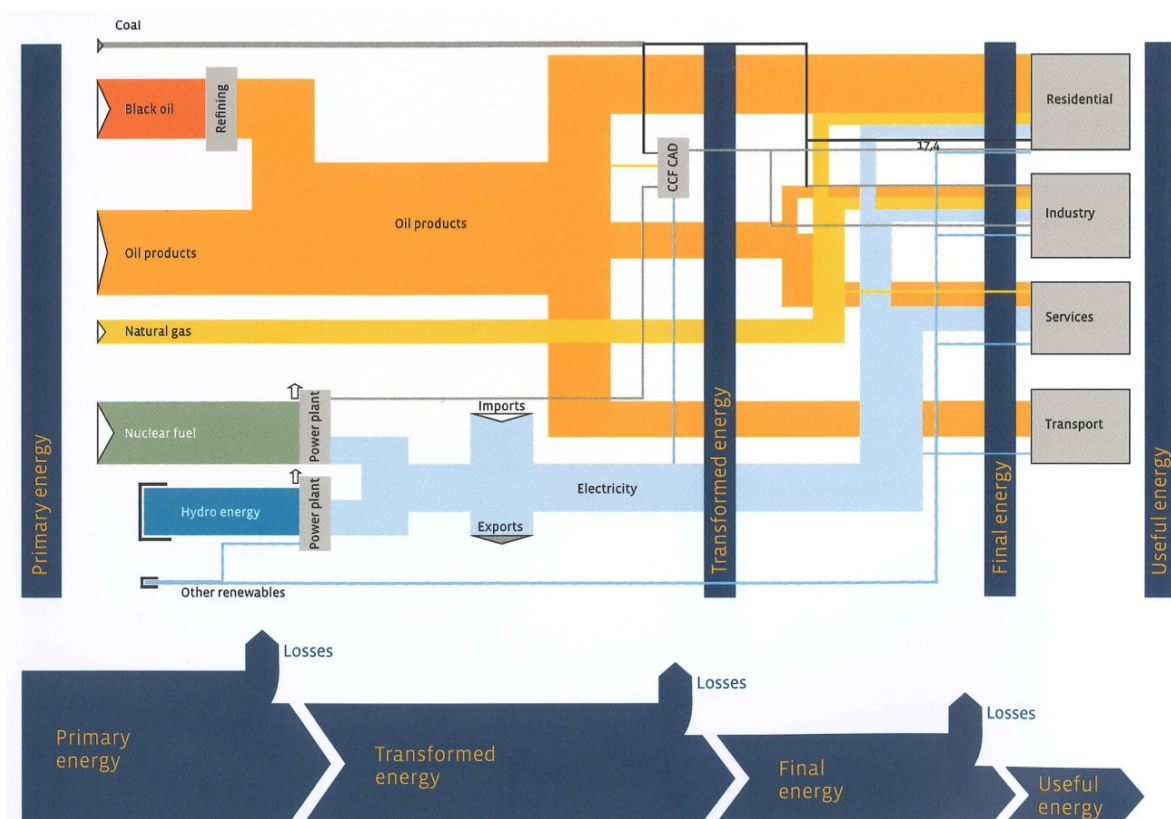
Tableau 10 - Liste des instruments/règlements au niveau individuel

## 2.2 Identification des contraintes et opportunités pour les villes et les producteurs indépendants

Le livrable de cette première partie des travaux est ainsi une grille d'évaluation qui met en relation les cinq niveaux décisionnels avec cinq niveaux caractérisant la chaîne énergétique : énergie primaire, énergie intermédiaire, énergie finale, énergie utile et services énergétiques.<sup>2</sup>

Dans cette optique, une matrice multi-entrées a été élaborée. Elle est composée, d'une part, des cinq niveaux décisionnels qui peuvent impacter les performances énergétiques d'une zone urbaine et, d'autre part, de la décomposition de la chaîne énergétique en quatre niveaux discrets. Elle sera utilisée dans le cadre du projet MEU comme grille d'évaluation des politiques énergétiques. Elle permettra, de plus, d'identifier à l'échelle des zones urbaines, quels sont les outils structurels qui ont été utilisés, quels sont ceux qui pourraient ou devraient être utilisés, et quel en est l'impact sur les performances énergétiques du système.

<sup>2</sup> Favrat D., Marechal F., Epelly O., *The challenge of introducing an energy indicator in a local law on energy*, Proceedings of ECOS (2006). Accepted for publication in Energy (2007)



**Figure 1 - Représentation du « Swiss Engine », soit de la chaîne énergétique globale suisse, qui présente quels sont les différentes sources d'énergie primaire et les principales technologies de conversion qui permettent de transformer les ressources en services énergétiques.<sup>3</sup>**

En particulier, dans le cas des réseaux de distribution de services énergétiques (chaleur, froid, etc.), l'analyse du cadre réglementaire via cette grille d'évaluation permettra d'identifier à quels niveaux décisionnels des actions devront être entreprises pour assurer une exploitation efficace et durable des installations. Par exemple, une législation cantonale ou un règlement communal peut rendre obligatoire la connexion des consommateurs de chaleur à un réseau de chauffage à distance, dans le cas où la chaleur distribuée provient majoritairement de ressources renouvelables. L'implémentation d'une telle régulation permet de garantir à moyen terme un nombre suffisant de consommateurs de chaleur pour justifier les investissements de départ liés à la construction des infrastructures.

Enfin, une évaluation des performances des systèmes énergétiques mis en place actuellement dans des zones urbaines, associée à la mise en œuvre de réglementations spécifiques, permettra de déterminer où se situent les principaux potentiels d'économie d'énergie et de diminution des émissions de CO<sub>2</sub>. Cette analyse permettra de comparer les résultats de différentes stratégies de planification énergétique menées par des collectivités publiques, comme par exemple la mise en œuvre d'un fonds de subventionnement pour la rénovation et le déploiement d'un réseau de chaleur alimenté par une source renouvelable.

Concrètement, chaque matrice multi-entrées devrait être spécifique à la zone analysée. En effet, il existe en Suisse une multitude de lois cantonales sur l'énergie, ainsi que de très nombreux règlements communaux. Toutefois, suite au projet MEU, la production d'une

<sup>3</sup> Source : Alpiq 2009

matrice contenant tous les outils structurels existant en Suisse permet de mettre à disposition des élus locaux et des planificateurs énergétiques urbains un aperçu de tous les outils structurels qui peuvent être utilisés.

	Personnes	Municipalité	Canton	Confédération	International
Services énergétiques	<b>D</b> : Prix / confort accepté	<b>Inc</b> : Conseils aux citoyens <b>Inv</b> : Subventions pour la rénovation	<b>R</b> : Loi sur l'énergie <b>R</b> : MoPECs <b>Inv</b> : Subventions pour la rénovation	<b>R</b> : LEne (marquage du courant, valeurs-cible de consommation des équipements) <b>Inc</b> : Conseils de l'OFEN	<b>Inc</b> : Directives EU
Energie finale	<b>D</b> : Choix de vecteur énergétique	<b>Inc</b> : Plan directeur des énergies <b>Inv</b> : Subventions pour la substitution	<b>R</b> : Obligation pour CECB <b>Inv</b> : Subventions pour la substitution	<b>Inv</b> : Subventions des CECB	
Energie intermédiaire		<b>Inv</b> : Production de chaleur à distance <b>Inv</b> : Productions renouvelables locales			<b>D</b> : Contrats d'importation
Energie primaire	<b>D</b> : Production renouvelable décentralisée	<b>Inv</b> : Utilisation des ressources renouvelables locales <b>R</b> : Reprise de l'énergie renouvelable produite localement	<b>R</b> : Electricité exempte de nucléaire (GE) <b>Inv</b> : Subventions pour la production d'énergie renouvelable (solaire, etc.)	<b>R</b> : Loi sur l'énergie <b>R</b> : LaPEL <b>Inv</b> : RPC	<b>R</b> : Accords de Kyoto

Tableau 11 - Exemple de grille d'évaluation contenant quelques exemples emblématiques (D : Décision; R : Réglementation; Inv : Investissements; Inc : Incitation)

### 3. Mise en application de l'analyse du cadre légal

Suite aux trois années de travaux, la plate-forme MEU permet aux décideurs urbains d'évaluer quantitativement l'impact énergie-climat de l'entrée en vigueur de nouveaux aspects réglementaires. La démarche *bottom-up* adoptée dès la phase de dépôt de projet a conduit le groupe de travail à décider que l'outil MEU devait permettre de quantifier l'impact d'une décision réglementaire sur les performances énergétiques d'une zone urbaine, mais uniquement en utilisant les fonctionnalités mises en place pour réaliser la planification énergétique territoriale. Ainsi, aucun développement spécifique à l'intégration du cadre légal n'a été entrepris sur l'interface de la plate-forme. Néanmoins, la structure de la base de données, de même que les solveurs de calcul, permettent d'intégrer dans les processus de planification énergétique territoriale les différents aspects réglementaires communaux, cantonaux et nationaux, voire internationaux.



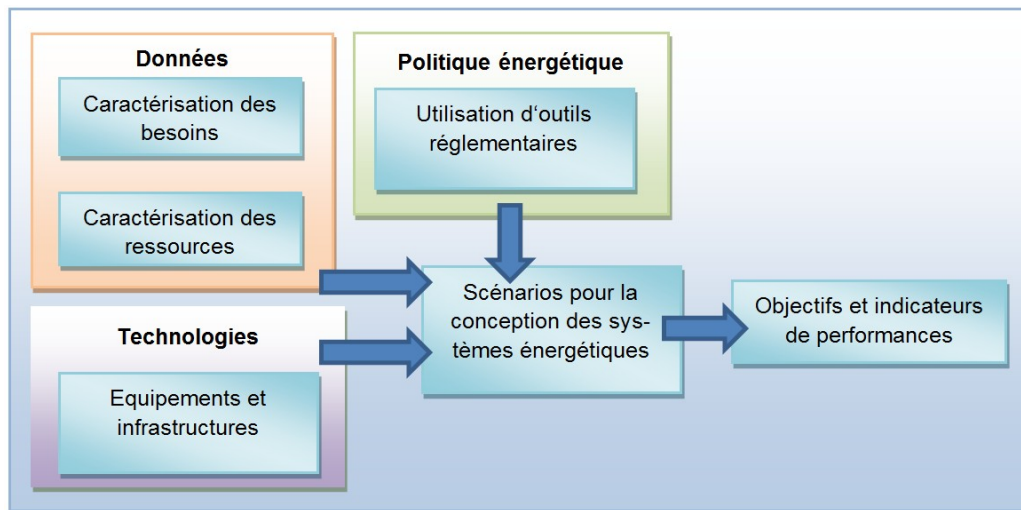


Figure 2 : Prise en compte des outils réglementaires dans l'élaboration de scénarios et l'évaluation des résultats

Plus spécifiquement, voici les principaux éléments qui peuvent être intégrés dans le calcul de scénarios par l'outil MEU:

- Les **obligations de raccordement à des réseaux de distribution d'énergie** (CAD notamment) peuvent être introduites par le biais des modifications globales prévues pour la construction de scénarios (changement global de technologie fournissant un service énergétique pour tous les bâtiments d'une zone).
- Les **prescriptions en termes de rénovations ou de construction de bâtiments** (locales ou non) se traduisent sur la plate-forme par des modifications des paramètres physiques des bâtiments, notamment au niveau des murs et des fenêtres. Les effets de telles prescriptions pourront ainsi être quantifiés directement soit au niveau d'un quartier, soit au niveau de l'ensemble du territoire communal.
- L'introduction de **l'obligation d'utiliser une énergie renouvelable**, comme l'énergie solaire pour l'ECS, peut être introduite par le biais de modifications globales telles que la pose de collecteurs solaires thermiques sur tous les toits non-protégés d'une zone, permettant de couvrir un certain pourcentage des besoins énergétiques pour l'ECS.
- Le **marquage de l'électricité et de la chaleur** des chauffages à distance est intégré dans la base de données et pris en compte dans les calculs de bilan. Ainsi, il est possible d'évaluer l'impact sur les performances énergie-climat d'une zone urbaine d'un changement de contrat d'approvisionnement.
- Les **plans directeurs communaux des énergies**, qui définissent des objectifs d'efficacité énergétique, de même que des zones d'influence pour l'utilisation d'énergies renouvelables (géothermie faible profondeur, bois, solaire, etc.) peuvent être pris en compte dans les scénarios. En effet, il est possible de paramétrer une zone de manière à la faire correspondre aux objectifs d'un plan directeur des énergies, de manière à évaluer l'impact de la mise en œuvre d'un tel plan.
- Les **choix des personnes physiques ou morales** peuvent être introduits dans la plate-forme, au moyen des modifications spécifiques des caractéristiques des bâtiments ou des technologies de conversion qui y sont intégrées.

Enfin, les objectifs nationaux et internationaux en termes d'économie d'énergie, de pénétration accrue des énergies renouvelables et de diminution des émissions de gaz à effet de serre pourront être intégrés au travers de la plate-forme MEU. En effet, cette dernière

permet, d'une part, un suivi de l'état des lieux énergétique du territoire et, d'autre part, de quantifier les changements des indicateurs pertinents en fonction des scénarios élaborés.

## **4. Modèle de données**

### **4.1 Mise en adéquation des modèles de données existants, en collaboration avec le groupe de travail**

Durant la première année du projet MEU, plusieurs séances ont été consacrées à la question des données, tant du point de vue des informations disponibles que des données d'entrée requises par les logiciels de simulation.

Les sources de données mises en évidence sont :

- les mesures de consommations des multi-distributeurs partenaires (utilisation annuelle, mensuelle voire horaire de gaz, électricité, chaleur, eau) et la connaissance implicite des technologies installées qui en découle,
- le registre des bâtiments (RegBL) de l'Office fédéral de la statistique (OFS) (informations utiles : identificateur fédéral de bâtiment (egid), numéro officiel de bâtiment (gebnr), coordonnées E/N (gkode/gkodn), adresse(s) (dstr, deinr, dplz4), statut (gstat), catégorie (gkat), année et période de construction (gbauj, gbaup), de rénovation (grenj, grenp) et de démolition (gabbj), surface (garea), nombre de niveaux (gastw), système de chauffage (gheiz), agents énergétiques chauffage et eau chaude (genhz, genww), installation de fourniture d'eau chaude (gwwv),
- le cadastre (plus particulièrement les couches incluant l'empreinte des bâtiments),
- les mesures LIDAR de terrain et de surface (mesures par laser de l'altitude du sol, respectivement de la hauteur de la couverture végétale et des bâtiments),
- entités tierces (pompiers, fournisseur de mazout, ...).

Les données nécessaires à la plate-forme MEU peuvent être classées ainsi :

- description des propriétés et fonctions des bâtiments,
- description des systèmes énergétiques installés dans les bâtiments et leurs propriétés
- données générales (données climatiques, propriétés des carburants et ressources énergétiques, propriétés des matériaux de construction ; voir annexe A),
- informations complémentaires nécessaires au bilan (liens entre bâtiments, systèmes énergétiques, réseaux et ressources, voir section 4.2)
- valeurs par défaut (voir section 4.5 et annexe A)

La première conclusion de ces discussions porte sur l'utilisation prioritaire des données de consommations mesurées (énergie finale : combustibles, chaleur, électricité), qui seront complétées sur la base des besoins simulés (énergie utile) et des modèles de systèmes énergétiques pour établir les bilans de l'état des lieux. Il a aussi été établi qu'une approche cartographique s'appuyant sur les empreintes des bâtiments était essentielle. Un cadastre numérique des empreintes formera donc une base pour le modèle de données, définissant les « bâtiments » comme unités fondamentales du système MEU.

La simulation des demandes par le logiciel CitySim requiert des informations détaillées (Workpackage 2, section 1.1) sur les enveloppes et au fonctionnement des bâtiments concernés, informations rarement disponibles pour les quartiers existants. La source de



données la plus complète et unifiée dans ce domaine est le RegBL. Ces informations, bien que parfois incomplètes et de qualité variable, seront utilisées comme base pour caractériser les bâtiments et complétées de données par défaut pour obtenir l'input nécessaire à CitySim. La Figure 3 représente les champs principaux de la table *building*. (Le schéma complet du modèle de données MEU est à disposition des partenaires sur l'intranet du projet.)

building	
<b>PK</b>	<b><u>oid</u></b>
<b>FK2</b>	<b>building_id_fk</b> fulladdress +md <b>height +md</b> <b>footprint +md</b> <b>sre +md</b>
<b>FK3</b>	main_allocation_id_fk +md
<b>FK4</b>	<b>gbaup +md</b> gbauj +md number_of_floors +md <b>altitude +md</b>
<b>FK1</b>	walltype_id_fk +md <b>wall_u_value +md</b> <b>glazing_ratio +md</b> <b>window_u_value +md</b> <b>window_g_value +md</b> <b>window_openable_ratio +md</b> <b>ground_k_value +md</b> <b>roof_u_value +md</b> <b>wall_shortwave_reflectance +md</b> <b>roof_shortwave_reflectance +md</b> <b>t_min_set_point +md</b> <b>t_max_set_point +md</b> <b>infiltration_rate +md</b> n_occupants +md

Figure 3 - Table *building* (simplifiée)

Les informations portant sur les systèmes énergétiques installés dans chaque bâtiment sont plus disparates et lacunaires encore : la seule base commune identifiée correspond aux informations très limitées du RegBL qui serviront à définir une ou des technologie(s) installée(s) par défaut dans les bâtiments. Tous les modèles de technologies disponibles sur la plate-forme MEU sont définis avec des paramètres par défaut (rendement, ressource utilisée, etc.). La Figure 4 représente les tables *technology* et *tag* qui contiennent toutes les informations relatives aux modèles de technologies décrits dans le Workpackage 2, section 3.2, et les tables *energysystem* et *tag\_value* qui décrivent les systèmes énergétiques particuliers enregistrés dans la base de donnée MEU.

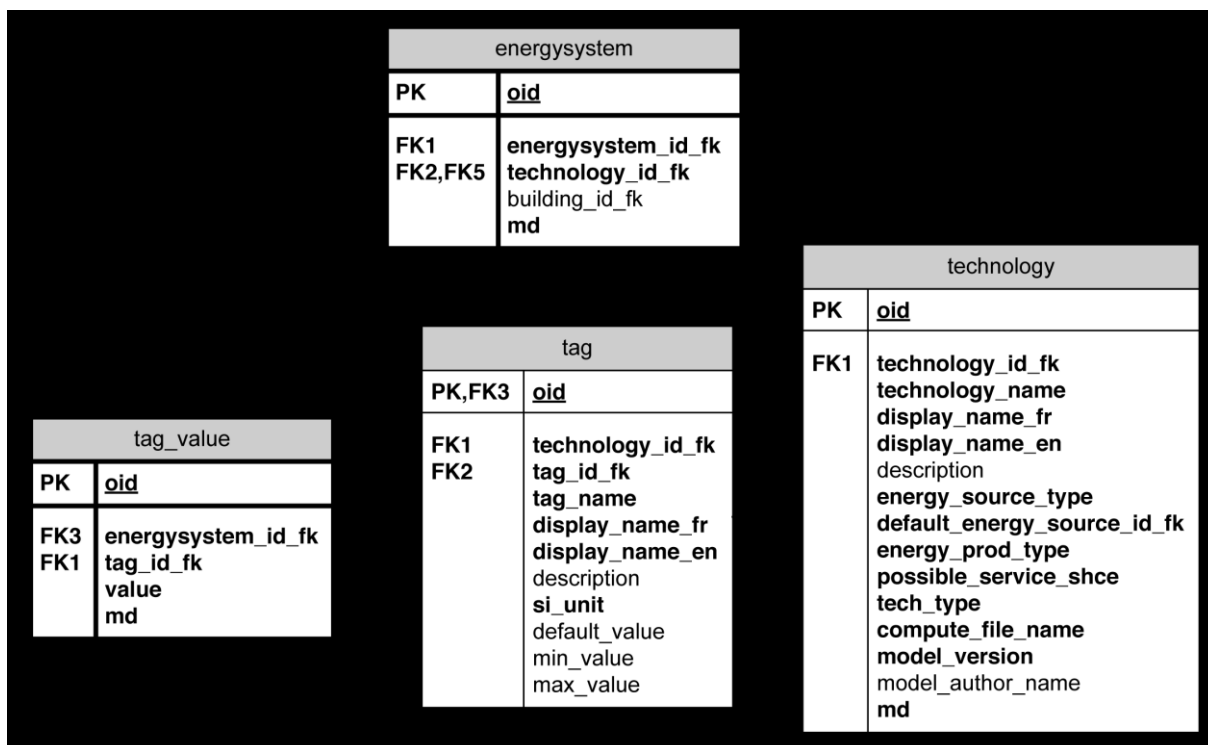


Figure 4 - Modèle de données des technologies (simplifié)

Pour mieux gérer la qualité variable des données et l'utilisation prévue de nombreuses données par défaut, chaque donnée ou objet important s'est vu attribuer une référence *md* à une métadonnée décrivant la qualité, le type et la provenance des données (Figure 5).

metadata	
PK	<u>metadata_id</u>
	user_name sourcetype datasource quality notes internal_code sourcedate

Figure 5 - Table *metadata*

#### 4.2 Développement et validation d'une structuration unifiée et flexible des informations

La décision centrale structurant le modèle de données MEU consiste à séparer les objets « systèmes énergétiques » des objets « bâtiments » : plutôt que d'attribuer à chaque bâtiment un système énergétique et une consommation pour chaque service énergétique, on considère qu'un nombre quelconque de systèmes énergétiques peuvent être installés dans

un bâtiment, et que ces systèmes peuvent fournir de la chaleur, du froid ou de l'électricité à un nombre quelconque de bâtiments pour les services associés.

Les raisons de ce choix sont multiples :

- volonté de considérer les flux d'énergie utile, finale et primaire,
- nécessité de pouvoir utiliser facilement les données de consommation finale réelles (qui se rapportent naturellement à un système énergétique plutôt qu'à un service pour un bâtiment),
- volonté de considérer explicitement les technologies complémentaires telles que panneaux solaires photovoltaïques et thermiques,
- volonté de pouvoir décrire des systèmes énergétiques fournissant plusieurs bâtiments.

Ces considérations ont imposé une approche « système » ou un modèle en « graphe » : des nœuds énergétiques (bâtiments, systèmes énergétiques, réseaux et ressources) sont connectés entre eux par des connexions décrivant le chemin des flux énergétiques.

Les quantités d'énergie entrant ou sortant de chacun des nœuds sont définies dans une table *annual\_energy\_flow*. Les identifiants de tous les nœuds sont regroupés dans une table *node\_ids* pour permettre la référence par les tables *connection* et *annual\_energy\_flow*. Cette approche se traduit par la Figure 6.

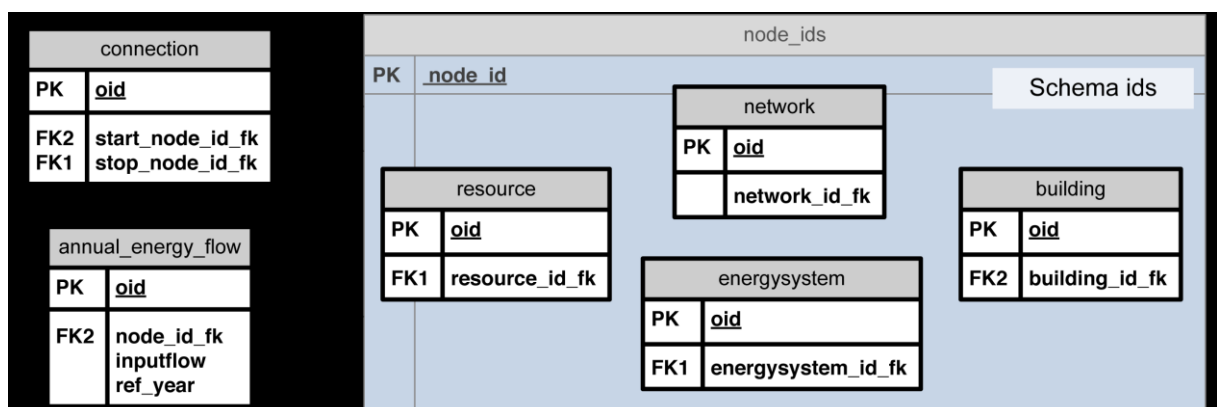


Figure 6 - Schéma simplifié des tables représentant le graphe des flux d'énergie

Cette approche, qui donne toute sa valeur à la plate-forme MEU génère aussi une complexité importante pour le calcul des bilans. En effet, si plusieurs systèmes énergétiques peuvent fournir le même service dans un bâtiment et / ou divers autres services dans un nombre quelconque de bâtiments, leur consommation d'énergie pouvant aussi bien être connue qu'inconnue, il devient nécessaire de définir systématiquement quelle fraction de quel service est fournie par quel système. Ces informations sont regroupées dans la table *connection*. Les processus de calcul de bilan décrits dans le workpackage 2, section 3.3 consisteront donc à adapter les paramètres des tables *connection* et *annual\_energy\_flow* de façon à rendre cohérentes ces fractions et à mettre à l'échelle les besoins simulés sur la base des consommations réelles.

Les tables *network* et *resource* contiennent respectivement les propriétés des réseaux et des ressources. Toutes les données nécessaires au bilan (énergie primaire, émission de gaz à effet de serre, points environnementaux) se trouvent dans la table *resource*, ce qui implique que le schéma énergétique doit relier systématiquement les bâtiments aux ressources, à

travers les systèmes énergétiques et réseaux appropriés. Pour plus de facilité d'usage, parmi les « ressources » se trouvent en réalité aussi des mix pré-calculés, dont le « mix électricité consommateur CH » par exemple. Le contenu par défaut des tables *network* et *resource* est décrit en détail dans l'annexe A, p. 87.

### 4.3 Temporalité

Les questions de suivi de performances sur plusieurs années et de définition de scénarios ont mené à l'adoption d'une base de données bi-temporelle, utilisant un « *valid time* » et un « *transaction time* ». Le *valid time* décrit la période d'existence réelle d'un objet : pour un bâtiment le *valid time* peut typiquement être la période [1985 ; ∞), 1985 étant la date de construction, et la date de destruction encore inconnue étant représentée par l'infini. On peut sur cette base décrire le bâtiment par « tranches » d'existence ; dans le cas d'une rénovation en 2005, le même bâtiment apparaîtra deux fois dans la base de données, pour les périodes (*valid time*) [1985 ; 2005) et [2005 ; ∞), avec des propriétés différentes pour les éléments rénovés. Le *valid time* est utilisé pour les tables *building*, *energysystem*, *network*, *resource*, *connection* et *tag\_value*.<sup>4</sup>

De même, la définition des scénarios (voir paragraphe suivant) a entraîné l'utilisation du *transaction time*, qui définit la validité d'une ligne dans la base de données. Lorsqu'une ligne est créée dans une table temporelle, son *transaction time* est fixé à la période [date de début de validité, ∞). Lorsque cette ligne est modifiée ou effacée, l'ancienne version ne disparaît pas, mais son *transaction time* est fixé à la période [date de début de validité, date de fin de validité), formant ainsi un historique complet des modifications de la table. La dernière version de tous les objets peut simplement être obtenue en sélectionnant les lignes dont le *transaction time* s'étend à l'infini. Le *transaction time* est géré automatiquement et n'est utilisé actuellement qu'à travers les scénarios. Il est défini sur toutes les tables dont la modification pourrait affecter les scénarios; ces tables sont représentées en rouge sur le schéma du modèle de données.<sup>5</sup>

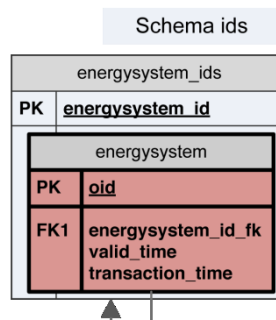


Figure 7 - La table *energysystem* est bi-temporelle : elle contient les colonnes *valid\_time* et *transaction\_time*. Les identifiants des systèmes énergétiques sont réunis dans la table *energysystem\_ids*.

<sup>4</sup> La définition des périodes est beaucoup plus fine que l'année, il s'agit ici uniquement de la granularité choisie pour la plateforme MEU.

<sup>5</sup> L'introduction de la temporalité complique le référencement des objets d'une table à l'autre, car le référencement nécessite une clé (un identifiant) unique, or les objets ne sont plus uniques puisqu'ils existent en différentes périodes de *valid time* et de *transaction time*. Ce problème (pas encore pris en charge par PostgreSQL ni aucun autre DBMS à notre connaissance) a été contourné par l'introduction de tables contenant chaque identifiant pour permettre le référencement. Ce sont les tables *table\_name\_ids* en bleu clair, qui sont regroupées dans un schéma « *ids* » (voir Figure 7). Des fonctionnalités PostgreSQL de support de la temporalité plus avancées sont en cours de développement

## 4.4 Scénarios

Les scénarios sont définis dans la table *scenario*, sur la base d'une année de référence (*valid time*) et d'une version de la base de données fixée (*transaction time*). Un nom et un identifiant *scenario\_id* uniques leur sont attribués. Chaque scénario doit faire référence à une année de référence qui a été simulée, afin de disposer d'un état des lieux d'origine.

Seules les modifications de la scène sont ensuite enregistrées dans la base de données, sous forme de nouvelles lignes avec un *scenario\_id\_fk* différent de 0 (le scénario 0 représentant l'état des lieux). Les tables principales pouvant accueillir des éléments relatifs au scénario sont représentées à la Figure 8.

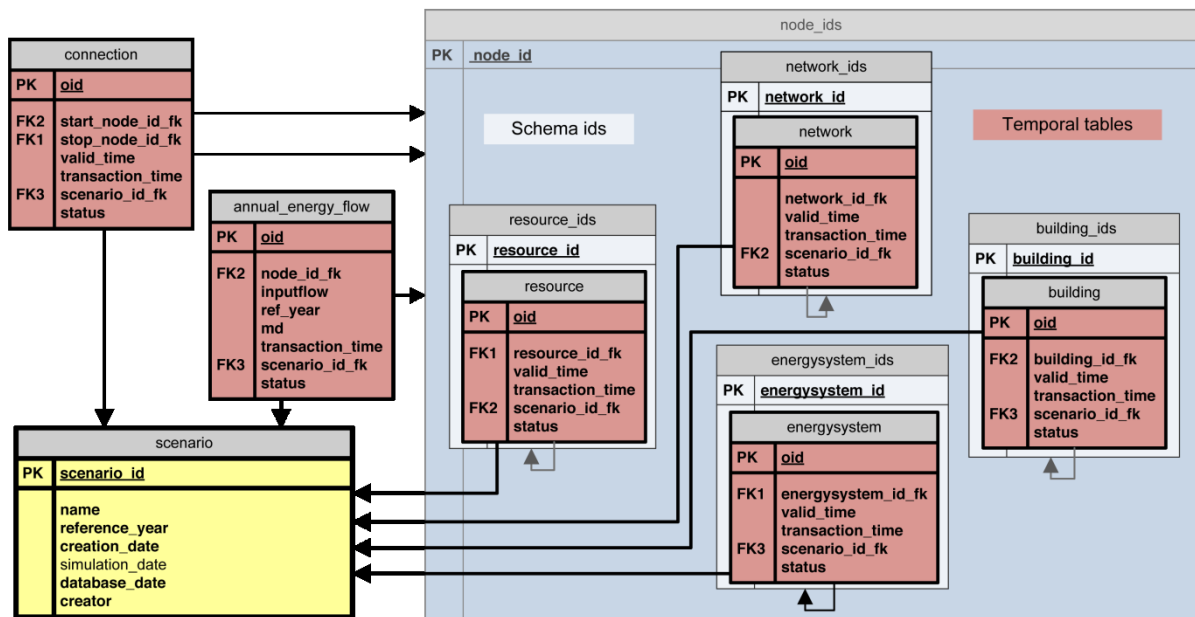


Figure 8 - Schéma simplifié des tables constituant les scénarios (des tables annexes ont été omises)

Un champ *status* permet de plus de spécifier les éléments qui sont détruits dans un scénario (mais existent dans le cas de base). Pour les objets dans le scénario, le *valid time* n'est pas utilisé, et on considère la dernière version selon le *transaction time* (pas de temporalité à l'intérieur d'un scénario). La vue d'un scénario est reconstituée en sélectionnant tous les éléments du scénario et les éléments de l'état des lieux lorsqu'ils n'ont pas été redéfinis dans le scénario (selon l'année de référence et le *transaction time* fixés dans la définition du scénario).

Un scénario se base donc sur l'état des lieux tel qu'il était lors de sa création en toute indépendance des modifications antérieures de l'état des lieux ; des fonctionnalités de mise à jour des scénarios et de copie seront développées dans le cadre de MEU 2012.

## 4.5 Valeurs par défaut

Pour permettre l'utilisation de modèles avancés et flexibles, tant pour la simulation des besoins (CitySim) que pour la simulation des systèmes énergétiques (ETech), tout en n'exigeant pas une quantité de données irréaliste pour une première approche, de nombreuses valeurs par défaut sont utilisées et attribuées automatiquement dans la base de données.

La plupart de ces valeurs (ainsi que quelques définitions de codes du RegBL ou de la SIA) sont regroupées dans les tables du schéma *def*. On y trouve en particulier des valeurs par défaut pour la description physique des bâtiments attribuées en fonction de la période de construction (*defaults\_from\_period*), les valeurs de la SIA utilisées pour l'estimation des besoins en électricité et eau chaude sur la base de l'affectation du bâtiment et de sa surface de référence énergétique (sre) (*sia\_default\_values*), les systèmes énergétiques qui seront affectés dans chaque bâtiment sur la base des données gheiz, genhz et genww du RegBL lorsqu'elles sont disponibles (*default\_heating\_energysystem* et *default\_hotwater\_energysystem*), et les fractions définissant la répartition par défaut de fourniture des différents services lorsque plusieurs systèmes énergétiques fournissent le même service dans un bâtiment (*es\_fraction\_default\_values*).

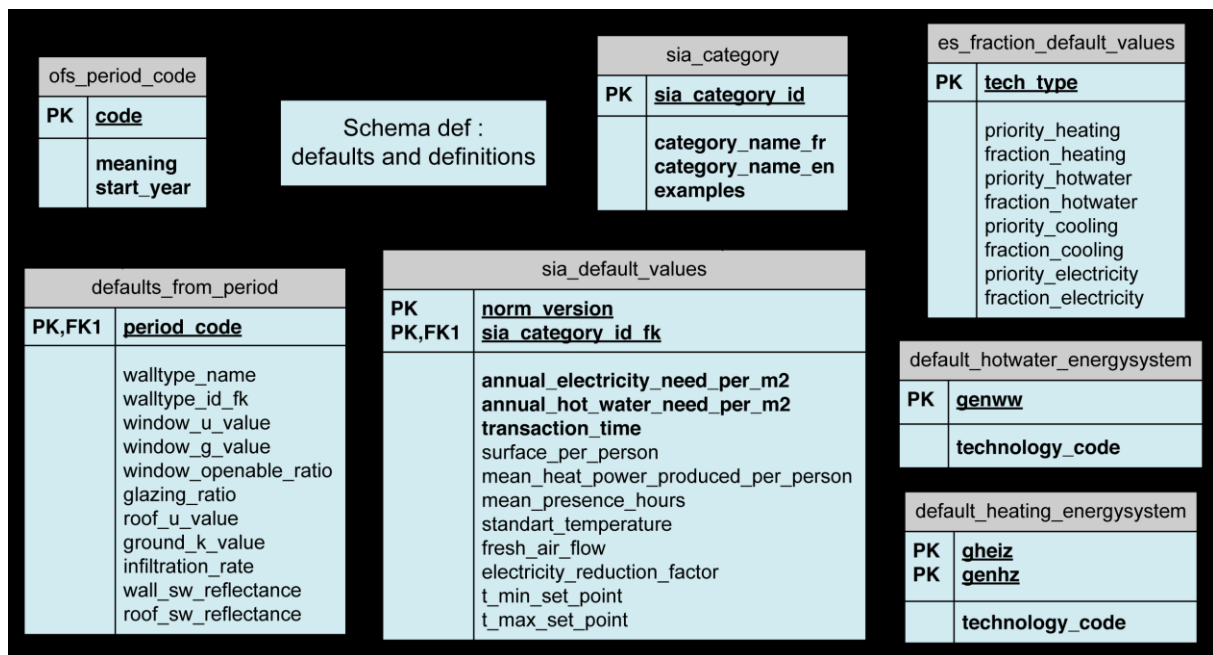


Figure 9 - Contenu du schéma *def*

Lorsque ces valeurs par défaut sont utilisées, les métadonnées correspondantes y sont automatiquement associées (source « par défaut », habituellement avec une qualité de zéro). Ces valeurs peuvent en tout temps être modifiées par l'utilisateur et ne sont utilisées que lorsqu'aucune autre information n'est fournie. Cette approche est comparable à l'utilisation d'un modèle simplifié, tout en laissant ouverte la possibilité d'améliorer le modèle d'entrée et donc la qualité des résultats de simulation.

Les paramètres par défaut des modèles de technologies sont définis dans la table *tag* ; selon la technologie, un nombre quelconque de tags peut être nécessaire. Lorsqu'un paramètre est modifié par l'utilisateur, sa valeur est stockée dans la table *tag\_value* et utilisée à la place de la valeur par défaut.

L'ensemble des valeurs par défaut et leur mode d'utilisation sont décrits dans l'annexe A p. 87.

#### 4.6 La base de données

La base de données a été développée à l'aide système de gestion de base de données (DBMS) opensource *PostgreSQL*, complété par le module spatial *PostGIS* pour la gestion des données géométriques, par le type *period* défini dans le package *Temporal PostgreSQL*, et par la librairie *timetravel* incluse dans PostgreSQL et modifiée pour utiliser le type *period*. L'accès par le serveur ArcGIS a par ailleurs nécessité l'installation du module *SDE* d'ESRI.

PostgreSQL permet de regrouper les tables, fonctions et autres objets d'une base de données dans différents schémas. La plus grande partie des tables et fonctions du modèle de données MEU sont définies dans le schéma *meu*, les autres schémas utilisés étant *postgis*, *temporal*, *sde*, *util*, *def* et *ids*.

#### 4.7 Fonctions

Le modèle de données MEU est complété d'une large collection de fonctions d'utilisation interne ou simplifiant son utilisation par les autres composants de la plateforme. Une partie de ces fonctions gère des mécanismes automatiques (triggers) relatifs à la temporalité, à la gestion des scénarios, et à l'attribution des valeurs par défaut. Quelques fonctions regroupées dans le schéma *util* simplifient des actions souvent utilisées. Les autres fonctions MEU sont définies dans le schéma *meu*.

Un premier groupe de fonction dont le nom est de la forme *get\_all\_nom\_de\_la\_table\_full* permet de sélectionner toutes les lignes d'une table valable dans un scénario spécifié et (pour le cas de base) à des dates *valid time* et *transaction time* données.

Le groupe de fonctions le plus important est dédié aux besoins de l'interface utilisateur (IU) et préfixé par *gui\_*. Les fonctions *gui\_get\_&*<sup>6</sup> fournissent les informations affichées par l'interface dans une structure adaptée, traduisant en particulier les connexions multiples ou à plusieurs niveaux en lignes facilement affichables dans les onglets « Technologie » et « Consommation » et préparant les données affichées dans l'onglet « Historique ». Les fonctions préfixées *gui\_create\_&*, *gui\_update\_&*, *gui\_&\_destruction* et *gui\_delete\_&* permettent de créer, mettre à jour, entrer une date de destruction ou effacer les objets (bâtiments, systèmes énergétiques), tout en gérant les connexions et dépendances relatives.

Deux autres groupes de fonctions, préfixées *citysim\_* et *techno\_*, offrent l'accès aux données nécessaires aux web services CitySim et ETech, pour la préparation des inputs et l'enregistrement des outputs.

Finalement, des fonctions préfixées *meuws\_* fournissent les données nécessaires au web service MEU pour la gestion des processus. Les principaux calculs nécessaires à l'établissement des bilans sont exécutés par les fonctions fondamentales *meuws\_update\_scaling\_factors\_and\_stop\_nodes\_fractions* et

---

<sup>6</sup> Le symbole & représente par la suite une famille de fonctions dont le nom est complété par un nom d'objet de la base de donnée ou d'autres mots définissant l'usage de la fonction.

*meuws\_update\_start\_nodes\_fractions\_and\_prod*, qui exécutent les étapes de calculs de répartition et de mises à l'échelle. Ces calculs seront décrits en détail au Workpackage 2 section 3.3.

#### 4.8 Vues

Le modèle de données contient finalement deux vues *arcgis\_view\_building* et *arcgis\_view\_results* sur les bâtiments et les résultats, masquant la complexité de la structure de données pour pouvoir facilement afficher des cartes par l'intermédiaire du serveur ArcGIS. La vue *arcgis\_view\_building* contient la dernière version des bâtiments pour chaque scénario, et pour toutes les années de l'état des lieux.

L'attribution de consommations d'énergie primaire et finale aux bâtiments pour la réalisation des cartes nécessitant un temps de calcul important, les résultats sont stockés temporairement dans la table *results\_per\_building* qui sert de base à la vue *arcgis\_view\_results*. Cette vue contient les résultats pour toutes les années de l'état des lieux qui ont été simulées, et tous les scénarios qui ont été simulés.

#### 4.9 Implémentation du cadre structurel et réglementaire dans le modèle de données

Tous les éléments liés au cadre légal, explicités au chapitre 3, sont intégrés dans la base de données. En particulier, les champs suivants sont inclus et permettent aux utilisateurs de modifier un scénario en fonction des aspects légaux et réglementaires :

- Prescriptions énergétiques liées à l'enveloppe des bâtiments
  - Types de mur
  - Types de vitrages
  - Valeur des coefficients de transfert thermique du sol et du toit
  - Températures de consignes
  - Renouvellement de l'air (taux d'infiltration)
- Obligations de raccordement : intégration de technologies de réseau (échangeur de chaleur) comme fournisseur de service chaleur dans les bâtiments des zones concernées
- Marquage du courant et de la chaleur : possibilité d'intégrer dans la base de données les technologies de production de chaleur / d'électricité distribuée, ainsi que leurs pondérations (ex. : Electricité – 56% renouvelable et 44% nucléaire)
- Installation de production décentralisée d'énergie renouvelable (ex. : obligation de produire 30% de l'eau chaude sanitaire avec de l'énergie renouvelable)
  - Solaire thermique / photovoltaïque
  - Pompes à chaleur
  - Biomasse (chaudière à bois, biogaz)

Ainsi, en dehors des aspects économiques, la quasi-totalité des réglementations mise en œuvre par les différentes échelles de gouvernance peuvent être intégrés dans la base de données. Au terme de ce projet de recherche, l'interaction avec ces données peut se faire en



partie au cas par cas via l'interface Web (données d'enveloppe et relatives aux technologies), ou alors directement dans la base de données (marquages).

Dans la suite des développements de ce projet, il est prévu, d'une part, de faciliter l'intégration de prescriptions / réglementations à l'échelle d'une zone, en utilisant des règles de modification globales, et, d'autre part, de développer une interface permettant de modifier depuis la plate-forme Web les marquages des énergies de réseau.

## **II. Workpackage 2 – Méthodologie générale, algorithmes et modèles numériques**

### **1. Revue des méthodes existantes et compatibilité avec les objectifs MEU**

#### **1.1 CitySim**

CitySim est un logiciel de simulation de la demande en énergie utile et finale des bâtiments qui s'appuie sur des modèles de radiation, d'échange thermique et de systèmes énergétiques pour calculer les besoins de chauffage, de refroidissement et d'éclairage. Les inputs sont constitués de données climatiques (sur une année), et d'une description détaillée de la géométrie et des caractéristiques de construction des bâtiments (position, forme, composition des murs, part de vitrage, conduction thermique du sol et du toit, présence d'occupants, températures de consigne minimum et maximum, systèmes énergétiques etc.). La simulation détermine les besoins en énergie heure par heure pour ces différents services.

CitySim est utilisé dans le cadre du projet MEU uniquement pour simuler les demandes en énergie utile sur la base du modèle de bâtiment présent dans la base de données, avec une géométrie simplifiée basée sur l'empreinte et la hauteur moyenne du bâtiment. Les projets urbains ont permis de tester minutieusement CitySim, de comparer en détail ses prédictions de demande en chauffage avec des mesures réelles sur un bâtiment de Martigny, d'étudier la sensibilité aux différents paramètres d'input des demandes de chauffage et de refroidissement simulées, et d'étudier en détail les besoins en froid de plusieurs bâtiments de Neuchâtel. Les conclusions de ces tests montrent que les prédictions déterministes de CitySim sont de bonne qualité, et que les facteurs limitant sa précision proviennent surtout des incertitudes relatives aux caractéristiques de construction des bâtiments existants et à l'aléatoire des comportements humains. Il a donc été estimé que l'utilisation de CitySim avec de nombreuses valeurs par défaut pour estimer les demandes serait tout aussi adaptée qu'un modèle statistique, tout en offrant l'avantage de pouvoir affiner les inputs lorsque cela s'avère nécessaire pour tester des scénarios détaillés.

#### **1.2 EnerGIS / Osmose**

EnerGIS a été utilisé dans le cadre d'un certain nombre de projets urbains afin de caractériser la demande en chaleur au niveau de la température et de la puissance pour une zone étudiée sous la forme d'une courbe composée. Le logiciel sort un premier ensemble d'indicateurs tels que des cartes de la demande en chaleur par bâtiment et par mètre carré, une estimation des coûts de chauffage et une liste des bâtiments triée selon la consommation d'énergie afin d'identifier les consommateurs importants. Ensuite le logiciel Osmose, également développé par le LENI, a été utilisé, afin de considérer la demande calculée par EnerGIS et de pouvoir comparer systématiquement les différentes technologies qui peuvent répondre à cette demande et identifier la solution optimale.

Par exemple, dans le cadre du projet urbain 2010 pour la ville de La Chaux-de-Fonds, les résultats obtenus ont démontré l'intérêt d'abaisser la température de retour du CAD. En effet, par le biais d'une température plus faible, les nouvelles constructions pourraient encore facilement être raccordées, tout en augmentant l'efficacité énergétique globale du système. Dans le cadre du projet urbain 2011 pour la ville de Lausanne, l'interconnexion et la

compatibilité entre CitySim et EnerGis a été mise en œuvre, permettant ainsi l'évaluation énergétique du nouveau quartier « Prés-de-Vidy ». L'extension proposée de la méthode d'ENERGIS permet ainsi de trouver six jours-type représentant toute l'année, en se basant sur les résultats de CitySim. Les solutions montrent notamment différentes possibilités avec des CADs à basse température, avec intégration des ressources locales renouvelables telles que l'eau du lac, les rejets de la STEP ou encore l'énergie solaire.

## 2. Cahier des charges

Un cahier des charges détaillé quant à la plate-forme informatique MEU a été élaboré par l'équipe de projet et validé par le Groupe de travail MEU. Ce cahier des charges est disponible en tant que document *stand-alone* depuis le 31 mai 2010. Les éléments les plus importants et structurants du cahier des charges sont reportés ici, afin d'illustrer précisément le cadre de fonctionnalités que doit remplir l'outil MEU.

### 2.1 Approche cartographique

La plate-forme informatique se base sur une représentation cartographique bidimensionnelle, Cette représentation cartographique des zones urbaines évaluées est utilisée tant pour la situation de départ ou état des lieux que pour la présentation de scénarios. La carte bidimensionnelle de la zone urbaine en considération représente un des deux espaces principaux de l'interface utilisateur de la plate-forme, en plus d'un certain nombre de fenêtres pop-up. La carte 2D d'une zone urbaine est importée d'un fichier du type « géodatabase » (par exemple : .shp, .kml, etc.) provenant en principe d'un cadastre numérisé, qui constitue donc la couche de données de base (empreintes des bâtiments au sol sous forme de polygones, parcelles, adresses, etc.). Il n'est pas possible de créer des entités géométriques directement depuis la plate-forme MEU.

Chaque bâtiment localisé dans le périmètre considéré représente une zone active qui peut être sélectionnée afin d'avoir accès à ses données attributives. Le « module cartographique » 2D de l'outil offre toutes les fonctionnalités de base des SIG : navigation, affichage par couche, zoom, options d'affichage ou symbologie, etc.

La plate-forme informatique n'offre pas encore la possibilité d'accéder à une représentation tridimensionnelle de la zone urbaine considérée. Par contre, la vue cartographique 2D permettra d'accéder à la hauteur des bâtiments, par consultation des données attributives. Ces données de hauteur pourront être générées soit à partir du nombre d'étages inscrit dans le RegBL, soit à partir des données 2.5D basées sur les données de type LIDAR. Le solveur CitySim utilisé par la plate-forme MEU tient compte de la géométrie 2.5D des bâtiments afin d'évaluer la demande énergétique.

La représentation cartographique offre la possibilité de représenter les propriétés des bâtiments par des couleurs ou des symboles simples sur les polygones les représentant, tant pour l'état des lieux que pour les résultats de calculs de scénarios. Les propriétés suivantes des bâtiments doivent notamment pouvoir apparaître :

- affectation(s);
- vecteur(s) énergétique(s) pour chauffage et ECS;
- indices de dépense d'énergies (chauffage, ECS, électricité, froid);
- consommations énergétiques annuelles (chauffage, ECS, électricité, froid);
- époque de construction ou rénovation.

Ces possibilités d'affichage sont directement gérées par le logiciel GIS.

## **2.2 Menus d'accès**

Des boutons spécifiques et clairs sont prévus pour accéder à et basculer entre différents « modes » de la plate-forme, à savoir :

- Etat des lieux / Scénarios
- Mode édition / Mode résultats

Les menus correspondant à ces modes sont adaptés en fonction des besoins.

## **2.3 Métadonnées**

De par la complexité, la masse et l'utilisation prévue des données dans le projet MEU, il est primordial d'inclure dans le modèle de données toute une série de métadonnées qui permettront de caractériser les statuts de ces dernières. Parmi les métadonnées à renseigner, les éléments suivants sont pris en compte :

- Unités physiques
- Nature ou statut : donnée standard ou par défaut, calculée, mesurée
- Si calculé : logiciel, fonction et version
- Qualité (qualitatif – Mauvais, moyen, bon excellent)
- Tag temporel
- Responsable (qui a enregistré / modifié / validé la valeur)
- Droits d'accès
- Type (real, string, matrix)

Ces métadonnées permettent de réaliser différents calculs (agrégation temporelle, précision, etc.) et d'assurer une traçabilité des données.

## **2.4 Echange et structuration de données; création du modèle de base**

L'outil informatique devra être capable d'importer les données des villes ou des multi-distributeurs énergétiques à partir de leurs différentes bases de données. Le(s) format(s) de transfert de base ont été déterminé(s) comme étant les fichiers .csv voire .xls pour les données tabulées, et .shp pour les géométries.

Quelle que soit l'utilisation qui en est faite, la plateforme MEU nécessite un modèle de base du quartier étudié. Ce modèle utilise les données présentes dans le RegBL et les empreintes au sol dans un format vectoriel (polygones), normalement contenues dans le cadastre, comme base pour les bâtiments. Dans un premier temps, le modèle est complété par des données par défaut, qui seront remplacées par les données réelles en fonction des besoins de l'utilisateur et de la disponibilité.

Les différentes étapes nécessaires à la création du modèle sont, en fonction des formats originaux :

- créer cadastre numérique avec empreintes des bâtiments sous forme de polygones
- exporter empreintes et, si disponible, points-adresses (shape ou format à définir)
- importer cadastre dans outil MEU (shape ou format à définir)
- importer données OFS dans outil MEU (texte ou format à définir)
- trier couches, choisir bâtiments
- lier adresses et empreintes (si nécessaire)
- lier OFS et empreintes, en utilisant l'EGID si disponible
- lier OFS et empreintes, par géolocalisation
- lier OFS et empreintes, par comparaison des adresses
- lier OFS et empreintes, autres
- "compléter" OFS : ajouter données autres bâtiments
- gérer différentes granularités
- enregistrement des adaptations pour update

L'outil MEU prendra bientôt en charge une partie de ces étapes, les autres étant du ressort des villes ou des utilisateurs. A terme, l'outil se concentrera sur l'aide pour la liaison des deux sources de données, avec la répartition des tâches suivante :

Utilisateur	Logiciel
<ul style="list-style-type: none"> <li>– choix du quartier à étudier ; création et exportation d'un fichier shape «propre» avec polygones pour les empreintes au sol et, selon disponibilité, points-adresses</li> <li>– exportation d'un ou de plusieurs fichier(s) textes contenant les données du RegBL</li> <li>– fourniture de fichiers similaires récents pour mise à jour</li> <li>– gestion des conflits et manques présentés par l'outil MEU</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>– définition bâtiment = empreinte</li> <li>– attribution des adresses et données RegBL aux bâtiments sur la base des coordonnées xy, des adresses et d'autres potentiels identifiants</li> <li>– présentation des conflits et avec options pour la résolution : modification des données input ou ajout d'éléments</li> <li>– enregistrement des solutions pour faciliter les mises à jour</li> <li>– rapport texte des modifications apportées pour mise à jour des bases de données d'origine</li> </ul>

Tableau 12 : Aide à la liaison entre RegBL et logiciel MEU

Les améliorations à apporter seront, dans un ordre de faisabilité et de priorité :

- import d'autres bases de données et spécification des formats à fournir
- lecture de fichiers Excel / autres formats
- outils pour l'importation du cadastre sous une forme brute et pour son traitement
  - importation et update automatique des données du RegBL par connexion au serveur de l'OFS
  - importation et update automatique des données du cadastre pour une zone demandée, voire de plusieurs couches du cadastre et/ou de toute la ville (spécifique à chaque ville)

- importation automatique d'autres bases de données spécifiques à chaque ville
- export sur demande des modifications dans le RegBL
- importation automatique d'autres données disponibles par internet (ortho-photos, ...)
- importation de données de projets de smart-metering ou de relevés manuels (fréquence de relevé variable)

Lors de l'importation de set de données, la version (année, voire fréquence plus élevée) devra être spécifiée, de manière à permettre un suivi des performances au cours du temps. En interne, l'outil gèrera le set de données de terrain selon son format propre, en le structurant selon le modèle décrit au chapitre 3.

La plateforme offrira aussi la possibilité d'exporter un extrait de la banque de données MEU sous la forme d'un fichier CSV, voire d'un tableur Excel en direct. Cette fonctionnalité devra permettre aux utilisateurs de travailler avec ces données ultérieurement, en dehors des fonctionnalités prévues pour l'outil MEU.

En sus du modèle de base, qui fournit les couches d'informations fondamentales de la plateforme informatique, une couche supplémentaire est constituée par les consommations mesurées des bâtiments d'une zone urbaine en termes de : chauffage et ECS (litres de mazout, m<sup>3</sup> de gaz naturel, m<sup>3</sup> de bois, kWh CAD et/ou électricité), eau, électricité, éventuellement froid. Actuellement, seules les consommations mesurées annuelles peuvent être enregistrées à travers de la plateforme.

Ces données peuvent, d'une part, provenir de campagnes de mesures ad hoc effectuées par les villes ou les sociétés multi-distributrices. D'autre part, elles peuvent provenir des fichiers de facturation de ces dernières, via une extraction informatique qui devra être effectuée préalablement, hors de la plateforme MEU proprement dite.

Les données peuvent être introduites manuellement, bâtiment par bâtiment et pourront, à terme, être introduites par importation d'un fichier informatique (typiquement Excel), sur la base d'un numéro d'identification unique par bâtiment.

## **2.5 Etat des lieux énergétique d'une zone urbaine**

Dans l'optique de calculer un état des lieux des consommations et des émissions d'une zone urbaine aussi proche que possible de la réalité (minimisation des erreurs), il est également nécessaire de calculer les besoins, respectivement les consommations, des bâtiments pour lesquels cette information n'est pas disponible.

Une estimation des besoins en énergie thermique des bâtiments sera effectuée par le biais du solveur CitySim, en se basant notamment sur :

- l'affectation et l'époque de construction (données RegBL);
- les données cadastrales (empreintes au sol);
- la hauteur moyenne, estimée à partir des données du RegBL ou d'une autre source

L'ensemble des consommations mesurées et estimées constituent ainsi l'état des lieux énergétique d'une zone urbaine (scénario de référence) qui peut notamment être caractérisé par l'année à laquelle ces données se réfèrent.

Si disponibles, les informations concernant l'emplacement précis des divers réseaux énergétiques seront introduites dans le système afin de pouvoir les caractériser :

- pour un réseau CAD, son mode d'approvisionnement énergétique (ou marquage de la chaleur), sa puissance disponible, ses niveaux de température (aller et retour), etc.;
- pour un réseau de gaz, la puissance (volume), voire le diamètre des conduites en entrée, voire des informations complémentaires, notamment quant à la présence ou non de biogaz dans le gaz distribué;
- pour le réseau électrique, le marquage du courant.

## **2.6 Modélisation des technologies**

L'outil s'appuie sur une banque de données de modèles de technologies de conversion énergétique. Cette banque de données doit également être en mesure de recevoir de nouveaux modèles, en fonction de l'évolution des options technologiques.

Les systèmes de conversion modélisés au sein de cette banque de données sont notamment caractérisés par leurs modes d'approvisionnement, leurs puissances, leurs niveaux de température et leurs rendements.

## **2.7 Création, caractérisation de scénarios**

Un des concepts fondamentaux de la plate-forme informatique MEU est celui de scénario.

L'état des lieux d'une zone urbaine considérée constitue un « scénario de référence », caractérisé par tous les attributs (réels, mesurés ou estimés, sur la base des données disponibles auprès des villes ou des multi-distributeurs énergétiques) de toutes les entités (bâtiments et systèmes d'approvisionnement). L'état des lieux est notamment caractérisé par l'année à laquelle il se réfère et peut être mis à jour par l'utilisateur selon ses besoins, par exemple sur base annuelle. Cette dernière option doit permettre de suivre dans le temps l'évolution des performances énergétiques de la zone évaluée.

Un nouveau scénario est représenté par un ensemble de modifications de l'état des lieux d'une zone urbaine (tant du point de vue des bâtiments que des systèmes d'approvisionnement ou, encore, de la réglementation). Sur la base de ces modifications en input, l'utilisateur lance le calcul qui va générer des données en output – résultats et indicateurs - pour la zone urbaine considérée. Le système garde en mémoire l'année à laquelle se réfère le scénario de référence dont est issu le nouveau scénario.

Les scénarios sont construits soit par le biais de modifications directes dans un premier temps et, à terme, en pouvant choisir des modifications globales proposées par le système. Un scénario est construit sur la base d'un nombre arbitraire de modifications, selon les besoins de l'utilisateur, pour une zone urbaine déterminée. Tant les données en input d'un scénario que les résultats/indicateurs correspondants en output sont sauvegardés par le système.

On peut ajouter des modifications à un scénario sauvegardé précédemment, avant de (re)lancer un calcul. Un utilisateur peut créer une bibliothèque de scénarios, qui est entièrement gérée par l'outil.

## **2.8 Calculs basés sur les scénarios - Bilans globaux et détaillés**

La plate-forme informatique MEU fournit des bilans énergétiques par bâtiment et, globalement, au niveau d'une zone urbaine considérée, sur la base du scénario sélectionné pour calcul par l'utilisateur. Ce dernier choisit le type de représentation des résultats. Tous les indicateurs résultant d'un calcul de scénario (qu'ils soient modifiés ou pas par le calcul) sont tagués comme tels et peuvent être appelés sur la base du scénario qui les a générés.

Des indicateurs sous forme de ratios sont proposés par l'outil pour un scénario complexe calculé. Notamment, l'outil permettra de calculer des ratios de proportion entre la situation de référence et celle résultant du scénario considéré (dans l'esprit des objectifs 3x20 ou des indicateurs de la société à 2000 Watts, par exemple).

## **2.9 Suivi des performances**

Le suivi des performances d'une zone urbaine du point de vue temporel est assuré par la comparaison des scénarios correspondant à des états des lieux (scénarios de référence) d'une année à l'autre.

Ce suivi des performances implique la réalisation de l'état des lieux (introduction des données de terrain – mesurées – et des estimations des consommations non-mesurées) pour chacune des années évaluées.

## **2.10 Données input**

Les données en entrée pour la plate-forme informatique décrivent tous les aspects d'une zone urbaine considérée – ou d'un ensemble de bâtiments arbitraire, d'un quartier, voire d'une ville entière – qui sont pertinents/nécessaires pour réaliser une planification énergétique territoriale. Ces données sont basées sur :

- les bâtiments et leurs caractéristiques physiques (murs, vitrages, etc.)
- leurs géolocalisations, leurs géométries (2D et 3D) et leurs orientations respectives
- les systèmes d'approvisionnement énergétiques (centralisés ou décentralisés)
- les réseaux énergétiques existants
- les ressources énergétiques locales et leurs caractéristiques (puissances disponibles, niveaux de températures, localisation)
- la météorologie locale
- les aspects règlementaires et structurels.

Pour l'unité fondamentale qu'est le bâtiment, on distingue tout d'abord les données structurelles. Une partie de ces dernières sont à introduire de manière obligatoire, soit :



- informations relatives au bâtiment considéré contenues dans le plan cadastral numérisé et importé de la zone urbaine considérée, soit des données géolocalisées et utilisables par un système d'informations géographiques en deux (empreinte au sol), voire trois dimensions si nécessaire.
- tous les champs caractérisant un bâtiment au sens du REG BL, tels que
  - numéro EGID;
  - évaluation des surfaces de référence énergétique des bâtiments;
  - dates de construction/rénovation;
  - affectations des bâtiments;
  - nombre d'étages;
  - vecteur(s) énergétique(s) pour le chauffage;
  - vecteur(s) énergétique(s) pour l'eau chaude sanitaire.

A côté de ces données structurelles obligatoires, les autres données structurelles en input qui pourront être introduites si connues sont notamment :

- caractéristiques physiques de l'enveloppe
  - composition des murs
  - surface et types de vitrage
- degré de protection du patrimoine des bâtiments considérés;
- nombre d'habitants / d'usagers;
- rendements des systèmes de conversion en place : systèmes de distribution de chaleur, en vue de déterminer les niveaux de température requis;
- la hauteur des bâtiments (calcul avec une hauteur standard par étage si non disponible).

Si ces données structurelles non-obligatoires ne sont pas disponibles, des valeurs seront introduites par défaut ou mises à zéro selon les cas, afin que les moteurs de calcul puissent tout de même être utilisés.

Les données non-structurelles caractérisant les bâtiments sont avant tout les consommations énergétiques (chauffage, ECS, refroidissement, électricité) et les consommations d'eau. Pour les consommations énergétiques, on pointera de manière prioritaire sur les valeurs mesurées (au moins annuelles). Si ces dernières sont inconnues – et que des efforts raisonnables n'ont pas permis de les connaître –, le système permettra d'estimer les demandes énergétiques du bâtiment en question, en se basant sur les données structurelles connues correspondantes.

Concernant la provenance des données de consommation, une majorité d'entre elles sont disponibles et en principe accessibles auprès du/des fournisseur(s) d'énergie local(-aux). En effet, pour des raisons évidentes de facturation, ces derniers comptabilisent les quantités d'électricité consommée de tous les bâtiments, ainsi que d'autres énergies (gaz, chauffage à distance) pour les bâtiments y connectés. De plus, ces derniers sont responsables de la fourniture d'électricité, soit aussi des contrats d'approvisionnement : le marquage de l'électricité achetée ou produite localement permet de calculer les émissions de CO<sub>2</sub> et facteurs d'énergie primaire du courant consommé. Les consommations d'eau sont à obtenir auprès du ou des distributeurs locaux.

La collecte des informations concernant les consommations de mazout s'avère généralement plus difficile, vu la non-centralisation des données (une collecte spécifique est à faire auprès de chacune des gérances immobilières et des propriétaires). Plusieurs méthodes d'évaluation des consommations ont été testées (capacité des citernes, puissances installées), mais n'ont à ce jour pas permis de définir un modèle suffisamment valide pour être utilisé à l'échelle du bâtiment.

En-dehors des bâtiments, les données caractérisant l'approvisionnement énergétique en input doivent également permettre de décrire les sources d'énergie locales ou extra-locales, telles que :

- réseaux CAD et gaz naturel
- potentiels pour énergies renouvelables, tels que : radiance solaire, surfaces disponibles pour des installations solaires thermique/PV, volume annuel de bois disponible (au niveau de la ville ou du district), volume de déchets pour gazéification, etc.
- zones permises pour sondes géothermiques de pompes à chaleur ou pour exploitation de l'énergie du sous-sol par des géo-structures (protection des eaux notamment)
- nappes phréatiques, lacs, sources géothermales à proximité (températures, distances, etc.)
- marquage de l'électricité
- marquage du CAD
- zones permises pour l'exploitation de l'énergie éolienne

Les distributeurs de gaz naturel / biogaz et de chaleur à distance sont les acteurs qui ont la maîtrise des plan de réseaux et par conséquent des zones d'influence des différentes énergies de réseau.

L'unité fondamentale est dans un premier temps celle du bâtiment. Toutefois, dans le futur, la possibilité de descendre à l'échelle de l'occupant d'un bâtiment comme unité de base devra être explorée en tant qu'élément *nice-to-have*.

## **2.11 Indicateurs (données output)**

Les données input structurelles des bâtiments provenant du plan cadastral ne seront en principe pas modifiées par les calculs effectués par l'outil informatique.

Par contre, les autres données structurelles et non-structurelles des bâtiments seront implicitement ou indirectement modifiées.

En particulier, les données non-structurelles modifiées par un calcul de scénario constituent une première partie des résultats au niveau des bâtiments, à l'instar des consommations énergétiques pour le chauffage et l'ECS (ou des indices de demande énergétique).

Parmi les indicateurs agrégés que l'outil fournit, sur la base des résultats d'un calcul de scénario constituant la zone urbaine considérée, on trouve :

- consommations d'énergie primaire et d'énergie finale;
- consommations par service énergétique (chauffage et ECS, électricité);

- émissions globales de gaz à effet de serre;
- production (en termes de puissance et d'énergie) d'énergies renouvelables au niveau local, par type et proportionnellement à la consommation totale de la zone ou de la ville considérée.

A terme, on pourra aussi calculer le potentiel d'amélioration des performances énergétiques des bâtiments (par rapport à des standards SIA ou Minergie®).

Il est a priori difficile de réaliser des analyses économiques de manière précise, notamment à cause de la variabilité des prix de l'énergie. Il conviendra néanmoins, dans le futur, de définir des indicateurs qui permettent de comparer des scénarios. Les calculs économiques seront basés sur :

- les investissements
- les coûts opératoires
- les durées d'amortissement et durée de vie
- les tarifs actuels des énergies et leurs évolutions prévues.

### **3. Adaptation et intégration des méthodes existantes pour répondre aux demandes du cahier des charges MEU**

#### **3.1 Solveur CitySim**

Les fonctions nécessaires de CitySim, concernant la simulation des besoins en chauffage et en refroidissement, ont été transformées en librairie. Un webservice CitySim dédié a été développé en C++, qui reçoit les appels et les inputs pour une simulation, et utilise directement la librairie CitySim pour créer les objets CitySim et simuler les demandes. Ce même web service renvoie ensuite les résultats sous la forme d'objets dédiés. La librairie CitySim peut être générée automatiquement sur la base de la version la plus récente de CitySim.

Dans le cadre du projet MEU, de nombreuses corrections et améliorations ont été apportées à CitySim. On notera en particulier l'ajout des pertes thermiques par le sol (valeur K) et la possibilité de décrire les murs uniquement avec une valeur U (simulation simplifiée sans inertie). Le web service CitySim estime aussi le besoin en chaleur pour l'eau chaude sanitaire et la demande en électricité, en se basant sur la surface du bâtiment et son affectation selon la norme SIA 380/1 et le cahier technique SIA 2031. Si aucune affectation n'est indiquée, les valeurs de la catégorie « administration » sont utilisées.

#### **3.2 E-Tech - Modélisations disponibles des technologies de conversion**

Afin d'avoir différentes technologies à disposition sur la plate-forme MEU, une approche systématique de modélisation a été choisie. Cette approche existe déjà au LENI, la langue et la manière de modéliser étant standardisées. Les modèles de technologie sont ensuite simplifiés et adaptés. L'avantage est que les logiciels du LENI, notamment Osmose, peuvent facilement être utilisés. Le code est également intégré dans un web-service afin de l'appeler dynamiquement depuis le web service MEU.

Pour MEU, une fonctionnalité majeure a été ajoutée : le modèle doit être utilisable dans les deux sens, c'est-à-dire que si la quantité d'énergie utile qui est consommée est connue, le modèle doit répondre avec l'estimation de la consommation en énergie. Dans le cas inverse, si la consommation est connue, la réponse du modèle est la quantité d'énergie utile délivrée.

La liste de technologies se trouve dans l'Annexe B, avec toutes les variables prises en compte par le modèle. La plupart des valeurs viennent de la norme SIA 2031. Au cas celui-ci ne contient pas la technologie recherchée, une valeur « best-practice » est définie comme valeur par défaut. Toutes les valeurs prédéfinies peuvent être changées avant un calcul par chaque utilisateur.

### 3.3 Développement du webservice MEU (orchestration des services)

Les web services CitySim et E-Tech permettent la simulation des besoins en énergie des bâtiments et du fonctionnement des systèmes énergétiques. Pour résoudre la complexité induite par le modèle en graphe choisi pour MEU, permettant de découpler systèmes énergétiques et bâtiments, des processus de calcul de bilan ont été développés dans un web service MEU et dans la base de données. L'approche pour le calcul des bilans peut être résumée ainsi :

#### 3.3.1 Simulation

- Simulation de toutes les demandes par le web service CitySim (étape « Simulation des demandes » de la Figure 10). Malgré les importantes incertitudes relatives aux bâtiments non-conventionnels, cette première étape permet de créer une base solide et complète pour la suite des calculs.
- Déduction de la production d'énergie des systèmes énergétiques de niveau 1 (i.e. lorsqu'elle est complètement définie par l'étape précédente : niveau 1, voir Figure 11 et étape « Déduction de la production des systèmes énergétiques » de la Figure 10). Cette étape s'appuie sur la répartition des services telle que définie par défaut ou modifiée à travers la plate-forme, et détermine où est utilisée la production de chaque système énergétique. La demande des systèmes énergétiques fournissant d'autres services énergétiques (compteur électrique incluant la consommation d'un boiler électrique par exemple) n'est pas encore définie à cette étape; elle le sera par itération. Le web service détermine sur quels bâtiments cette procédure doit être effectuée et appelle la fonction *meuws\_update\_start\_node\_fraction\_and\_prods*, qui réalise tous les calculs dans la base de données.
- Calcul de la consommation des systèmes énergétiques dont la demande a été définie à l'étape précédente, par appel des web services E-Tech (voir la dernière étape de la Figure 10).
- Répétition des deux étapes précédentes au niveau supérieur, jusqu'à ce que la demande de tous les systèmes énergétiques soit calculée (La Figure 11 illustre ce concept de « niveau »)

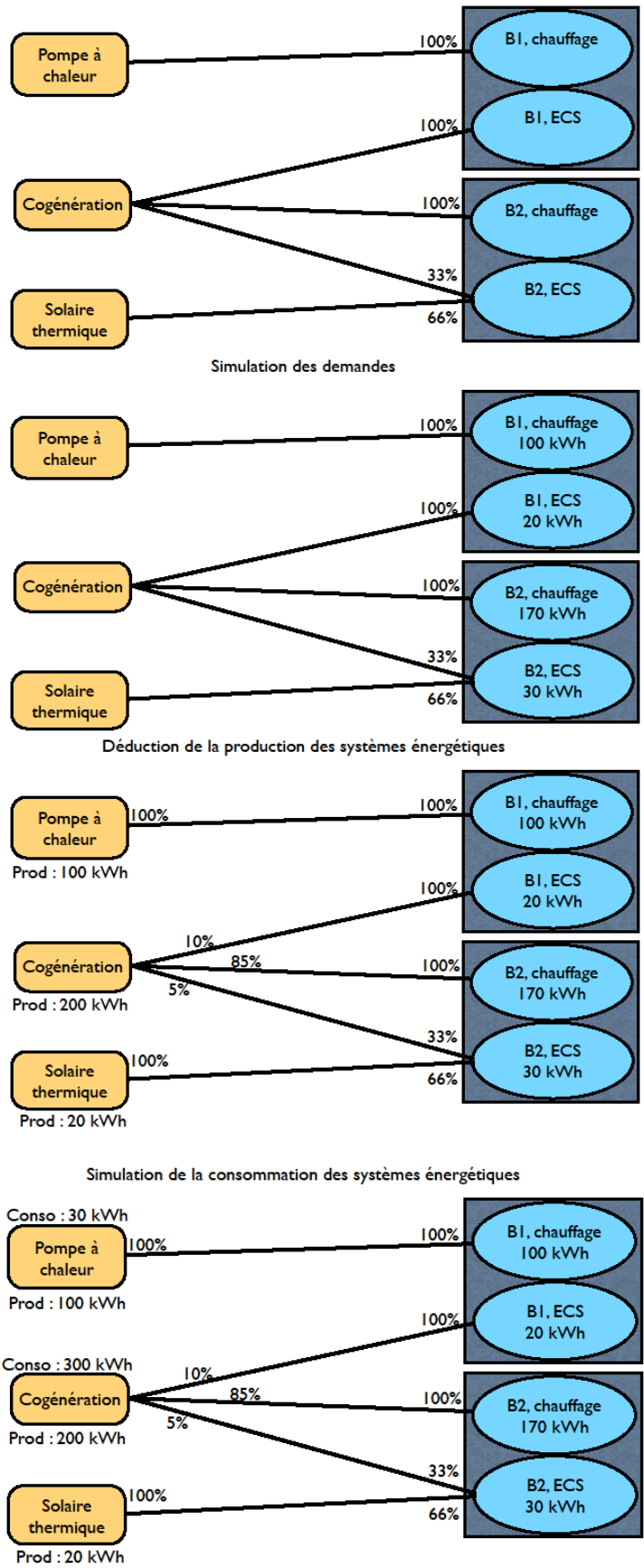


Figure 10 - Représentation simplifiée des étapes de simulation (3.3.1 avant mise à l'échelle)

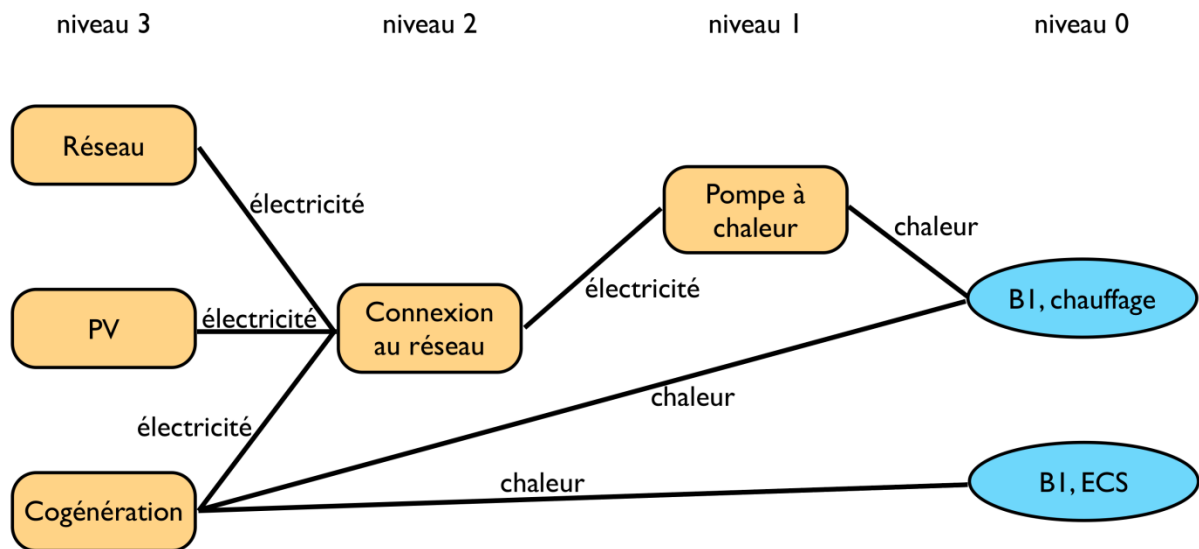


Figure 11 - Représentation en graphe des flux d'énergie : exemple

### 3.3.2 Mise à l'échelle

- Calcul par les web services E-Tech de la production des systèmes du niveau le plus élevé et dont la consommation réelle a été entrée par l'utilisateur. Le résultat est enregistré sous la forme d'un facteur de mise à l'échelle des valeurs calculées par le processus « simulation ».
- La consommation réelle des systèmes énergétiques et services fournis par les productions calculées à l'étape précédente est déduite et enregistrée (sous la forme d'un facteur de mise à l'échelle). Si suffisamment de données de consommation ont été entrées, la répartition de la fourniture des services peut être modifiée pour correspondre à ces données. Le web service MEU détermine quels sont les systèmes énergétiques concernés à chaque étape et appelle la fonction *meuws\_update\_cons\_and\_stop\_node\_fractions*, qui effectue tous les calculs dans la base de données.
- Les deux étapes précédentes sont répétées sur les systèmes énergétiques de niveaux inférieurs jusqu'à ce que toutes les consommations réelles aient été utilisées pour mettre à l'échelle les flux d'énergie et corriger les répartitions.
- Enregistrement dans la base de données de la date de simulation (année de l'état des lieux ou scénario) et copie des résultats dans la table *results\_per\_building* (fonction *meuws\_save\_simulation\_results*)

### 3.3.3 Cas particuliers

Les étapes décrites ci-dessus font apparaître différents cas particuliers dont les principaux sont décrits ici :

- Les panneaux solaires photovoltaïques ne peuvent pas être une source directe pour les services, puisque la demande ne saurait définir la production, pas plus que la production simulée ne peut être utilisée pour mettre à l'échelle la demande. Les

options proposées pour le solaire photovoltaïque sont donc soit de le lier aux compteurs électriques (auquel cas la production est soustraite à la consommation d'électricité et donc incluse dans le bilan) soit de sélectionner l'option « courant électrique exporté » (auquel cas la production est considérée indépendante du bilan).

- Les panneaux solaires thermiques peuvent fournir directement le service eau chaude ou chauffage, dans la mesure de leurs moyens. On effectue donc un premier bilan sans vérifier la fraction qui est fournie par le solaire (mise à l'échelle en fonction des autres systèmes énergétiques concernés). Les panneaux solaires thermiques sont ensuite simulés : si la production simulée est inférieure à la demande (et seulement dans ce cas), la demande est mise à l'échelle. Le modèle de technologie solaire thermique sert donc uniquement de facteur limitant. Ce choix découle du manque systématique de données relatives au stockage de la chaleur et d'un souci de simplification.
- Les cogénérations sont incluses dans les processus de mise à l'échelle (3.3.1 et 3.3.2 ci-dessus) pour leur production de chaleur. Une fois la consommation et la production de chaleur fixées, la production d'électricité est calculée et traitée de la même manière que la production du solaire photovoltaïque.
- La consommation entrée manuellement pour les systèmes énergétiques (pour les compteurs électriques en particulier) est toujours interprétée comme la part provenant de la source qui est sélectionnée dans l'interface. La quantité d'énergie totale « entrante » est cette consommation plus la part provenant d'autres systèmes énergétiques (production d'électricité du solaire photovoltaïque et des cogénérations liées au compteur électrique, par exemple).
- Il est (pour l'instant du moins) impossible d'entrer la consommation d'un système énergétique si celui-ci s'approvisionne à un autre système énergétique. Par exemple, un boiler électrique dont la source est le raccordement électrique ne peut pas avoir une consommation entrée manuellement, pour éviter des incohérences entre les données. Par contre si la source du boiler est le réseau électrique, il n'y a pas de restriction.

### **3.4 Modélisations des réseaux et gestion des puissances**

La prise en compte de la dimension spatiale des réseaux de distribution d'énergie ne se fait actuellement qu'au travers de la publication des cartes de réseaux (gaz naturel, électricité, chauffage à distance, eaux potables et usées, etc.). Les réseaux eux-mêmes sont pour l'instant définis uniquement par leurs sources (marquage) et les systèmes qui y sont connectés.

Néanmoins, la base de données et les solveurs de calcul ont été conçus de manière à générer et à intégrer les informations principales nécessaires au dimensionnement de réseaux. Les solveurs de calcul permettent en effet de générer la demande thermique des bâtiments présents sur la zone analysée, de même que de transformer les consommations d'énergie mesurées disponibles en demandes thermiques. Ainsi, la plate-forme permet de disposer des besoins thermiques de chacun des bâtiments de la zone et par la même d'une estimation de la puissance de dimensionnement des installations de chauffage. De même, l'utilisateur peut enregistrer sur la plate-forme les informations relatives à la puissance des équipements installés là où ces dernières sont disponibles.

Ainsi, en agrégeant les valeurs de puissance thermique des bâtiments connectés à un réseau, l'outil MEU permet d'estimer la puissance de dimensionnement des installations de production de chaleur pour le réseau analysé.

Ces fonctionnalités ne sont pas encore accessibles depuis l'interface Web, notamment quant aux puissances agrégées pour un réseau spécifique. Néanmoins une partie des moteurs de calcul ainsi que les champs nécessaires à l'enregistrement / la lecture dans la base de données sont réalisés. Concernant les perspectives futures de cette plate-forme, l'intégration de modèles dynamiques de réseaux paraît particulièrement intéressante. Actuellement, les énergies de réseaux sont caractérisées uniquement par l'énergie totale distribuée. Dans un objectif d'intégration énergétique, une modélisation dynamique des dits réseaux permettrait de tenir compte des variations de puissances soutirées (courbe de charge horaire annuelle ou pour un nombre minimum de jours types) et ainsi de simuler l'opération des différents systèmes de conversion d'énergie. Cette étape est un élément nécessaire au dimensionnement des installations, notamment pour des questions de rentabilité économique. Par exemple, un nombre d'heures de fonctionnement minimum à charges nominale et partielle garantit la viabilité économique d'installations du type des couplages chaleur force, chaudières à bois etc. Dans le même sens, des informations quant aux températures de distribution de chaleur dans les bâtiments devraient être intégrées dans la base de données.

Une modélisation dynamique des demandes et productions permettrait à terme d'inclure un modèle de stockage (centralisé ou distribué), de manière à :

- Ecrêter les puissances maximales soutirées en réalisant des stockages à court terme
- Stocker les productions d'énergie renouvelable à long terme (stockage saisonnier d'énergie solaire)
- Optimiser la viabilité économique d'installations de production de chaleur et/ou d'électricité en procédant à des stockages court, moyen et long terme : production pilotée par des tarifications dynamiques, fonctionnement à charge nominale pour augmenter les rendements, diminution du nombre d'allumages, etc.

Enfin, au-delà de modèles dynamiques de production / consommation, des modèles de simulation du fonctionnement des réseaux pourraient être implémentés. Il s'agirait ainsi d'intégrer dans la base de données les attributs caractérisant l'infrastructure réseau (conduites, câbles, nœuds, etc.), de même que des modèles de déperdition électrique et thermique.



# III. Workpackage 3 - Développement d'un outil d'aide à la décision

## 1. Construction de la plate-forme informatique

### 1.1 Architecture système

La plate-forme MEU est une application multicouche, dont les différents composants sont distribués entre le client et le serveur, afin de séparer clairement le traitement des données.

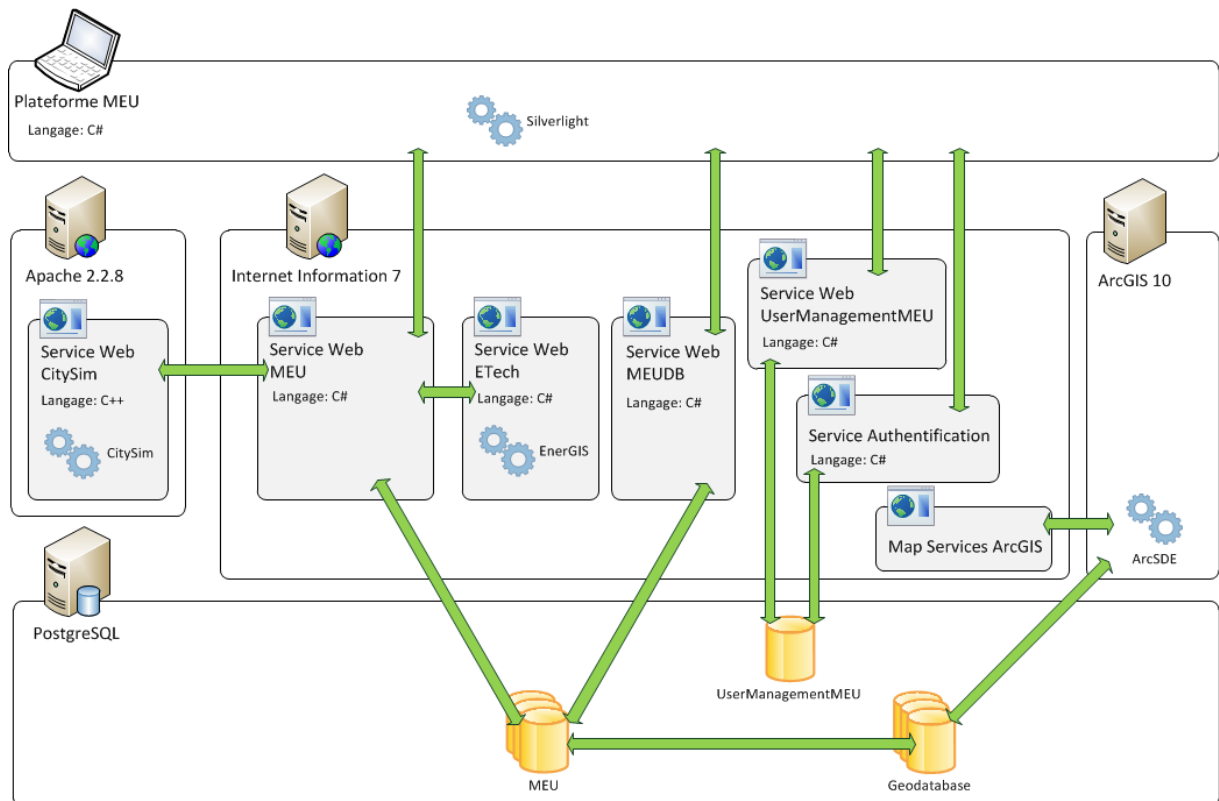


Figure 12 : Architecture système de la plate-forme MEU

La couche de présentation correspond à l'interface web avec laquelle l'utilisateur interagit avec la plate-forme. Cette interface utilisateur a été développée en Silverlight. Il s'agit d'une technologie Microsoft permettant de créer des Rich Internet Application (RIA). Cette technologie offre la possibilité de créer des applications web évoluées offrant davantage de fonctionnalités que les applications web classiques. Ainsi la carte affichée dans la plate-forme MEU augmente l'interactivité avec l'utilisateur. De même, les données affichées dans les grilles, ne nécessitent pas le rechargement complet de la page lors de leur mise à jour. Ou encore, les « pop-up », que l'utilisateur affiche ou masque, contribuent à améliorer l'expérience utilisateur de la plate-forme MEU.

Silverlight a été choisi suite à une première utilisation lors du projet SyGEMe par un des membres du groupe de travail technique. Dans ce projet, l'interaction avec un système d'informations géographiques (SIG) via cette technologie avait déjà été testée et avait été concluante. De plus la société ESRI propose une API pour Silverlight permettant d'utiliser leur SIG.

La couche intermédiaire contient tous les modules permettant la communication entre la couche de présentation en Silverlight et la couche de données. Il s'agit essentiellement de services web :

- Map Services ArcGIS : ce sont les services web ESRI publiés selon les données présentes dans la couche ArcSDE des bases de données géographiques de chaque ville. Ils permettent d'afficher les différentes couches (arrière-plan, empreintes des bâtiments et résultats) dans la carte Silverlight de la plate-forme. Ces services web utilisent le protocole REST.
- Service MEUDB : ce service permet toutes les manipulations de données nécessitées (affichage, ajout, suppression et modification) par l'interface utilisateur Silverlight. Il s'agit d'un service web Windows Communication Foundation (WCF), une autre technologie Microsoft, qui fait partie du framework .NET et met à disposition un modèle de programmation unifié pour rapidement construire des applications orientées service. Ce service est écrit en C#.
- Service UserManagementMEU : ce service se connecte à une base de données centralisée contenant tous les utilisateurs de la plate-forme MEU. Il permet de connaître pour chaque utilisateur quelle ville et quelles couches afficher dans la carte Silverlight. Il s'agit également d'un service web WCF qui est écrit en C#.
- Service Authentification : ce service est responsable de vérifier les données d'authentification des utilisateurs lors de leur connexion à la plate-forme MEU. Ce service se connecte à la base de données UserManagementMEU. Il s'agit d'un service web écrit en C# et qui est spécialement adapté à une intégration avec une application utilisant Silverlight.
- Service MEU : ce service est responsable de l'orchestration des services ETech et CitySim. C'est-à-dire qu'il possède l'intelligence nécessaire à appeler ces deux solveurs selon les besoins nécessitées par la demande qu'il a reçue. Il s'agit également d'un service web WCF qui est écrit en C#.
- Service ETech : ce service fait des appels au solveur ETech. Il encapsule un runtime MatLab qui permet d'exécuter ce solveur. Il s'agit également d'un service web WCF qui est écrit en C#.
- Service CitySim : ce service fait des appels au solveur CitySim. Il s'agit d'un service web SOAP qui est écrit en C++. Ce langage a été choisi pour optimiser l'appel au solveur, qui est écrit en C++.

Le langage C# a été choisi suite à la décision de développer l'interface utilisateur en Silverlight. De plus, ce langage était maîtrisé par des membres du groupe de travail technique, responsables du développement de la plate-forme MEU. Enfin ce langage permet de développer rapidement et simplement des services web.

Dans la couche intermédiaire se trouve également le serveur ArcGIS. Il s'agit d'un produit ESRI permettant de créer et gérer tous les services, applications et données nécessaires au fonctionnement d'un SIG. On y trouve notamment le moteur ArcSDE qui permet de faire la passerelle entre les données et les Map Services.

La couche de données contient le serveur de base de données PostgreSQL qui héberge les bases de données UserManagementMEU (gestion des données utilisateurs) et MEU (gestion des données des bâtiments). Il n'y a qu'une seule base de données centralisée UserManagementMEU, alors que pour chaque ville une base de données MEU est créée. Chaque base de données géographiques MEU contient un module ArcSDE permettant l'accès à certaines vues par le serveur ArcGIS.

Ce découpage en plusieurs couches et surtout l'utilisation de services web ont permis un découpage des fonctionnalités et une certaine généricité. De telle sorte que, par exemple, l'utilisation d'un autre solveur que CitySim ou EnerGIS nécessiterait un minimum de travail.

Par contre, il est vrai que cette architecture implique un certain niveau de complexité. Ainsi, l'implication de plusieurs serveurs (avec des systèmes d'exploitation différents), langages et technologies rendent l'hébergement d'une telle plate-forme plus contraignant. Il faut disposer d'une infrastructure très hétérogène. De plus, la maintenance nécessite des ressources humaines ayant des connaissances dans de nombreux domaines.

## **1.2 Elaboration des spécifications de requis et de design**

La plate-forme informatique MEU sera réalisée entièrement sur la base d'un service web, accessible à partir de n'importe quel navigateur internet. Elle sera notamment basée sur une approche cartographique, permettant de visualiser tant l'état des lieux énergétique d'un quartier que les résultats émanant des scénarios construits par les utilisateurs.

Pour garantir une bonne interaction entre ingénieurs, experts dans les compétences métiers et les développeurs, des «use-cases» ont été réalisés par l'équipe de projet en guise de spécifications de détail. L'objectif de ces uses cases est de concevoir et de définir de manière détaillée le design des différentes interfaces et fonctions à disposition sur la plate-forme. La définition de ces spécifications de détail commence par l'élaboration de maquettes d'écran (voir Figure 13). Ces maquettes sont ensuite présentées au groupe de développement du projet, voir au groupe de travail, puis améliorées suivant différentes itérations. Une fois que ces « use-cases », ou spécifications de détail, sont validées par l'ensemble des partenaires impliqués, elles servent de base solide aux développements informatiques. Cette étape préliminaire de définition des « use-cases » a ainsi pour objectif d'itérer les réflexions quant à l'utilisabilité de la plateforme informatique, avant les phases de développement.

Différents use-cases ont été réalisés dans le cadre du projet MEU. Ils sont présentés succinctement ci-dessous et sont disponibles si besoin sur le site Intranet du projet. Les fonctionnalités résultantes de ces uses cases ne sont pas explicitées ici, le fonctionnement de la plate-forme étant présenté en détail au chapitre suivant.

### Use-case Bâtiment

Le premier objectif de la plateforme MEU consiste à pouvoir consulter / éditer des données qui sont relatives aux bâtiments présents sur une scène. Ce use-case avait pour objectif de définir la manière dont les utilisateurs peuvent interagir avec ces données, notamment pour la sélection du bâtiment, la consultation / édition des attributs d'un bâtiment, le type de données affichées quant à l'enveloppe des bâtiments, etc.

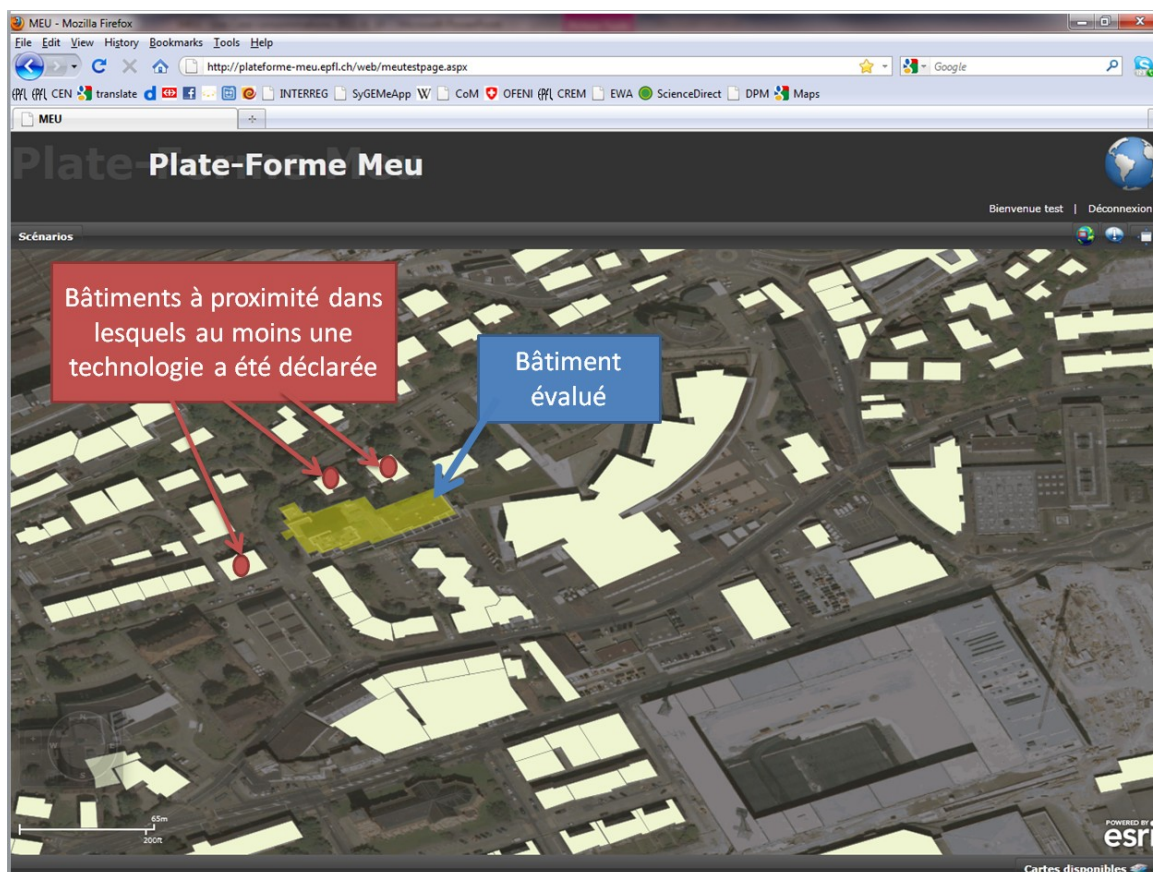


Figure 13 - Exemple de maquette d'écran : localisation des bâtiments dans lesquels une technologie a été définie

### Use-case temporalité

L'un des objectifs de la plateforme MEU est celui de permettre le suivi des performances énergétiques des quartiers, de même que l'évolution des bâtiments, infrastructures et systèmes énergétiques dans le temps. Dans cet esprit, l'ergonomie de la plateforme a été imaginée de manière à permettre aux utilisateurs de naviguer dans le temps à l'aide d'une « barre temporelle ». Cet outil de navigation permet de modifier de manière simultanée les attributs (consommations, caractéristiques de l'enveloppe, systèmes d'approvisionnements, etc.) de tous les bâtiments présents dans la zone évaluée. De plus, chaque bâtiment possède un historique qui renseigne l'utilisateur tant sur son époque de construction que sur les rénovations énergétiques y apportées. D'autres fonctions avancées quant à la temporalité ont été définies dans ce « use-case ». Ces fonctions n'ont néanmoins pas été retenues comme prioritaires par le groupe de travail du projet et n'ont ainsi pas été développées sur la plate-forme.

### Use-case consommations

Tel que précisé précédemment, la base de données du projet MEU permet de traiter des problématiques de terrain complexes, notamment quant aux liaisons n-m entre bâtiments, technologies et service fournis. Le use case consommation a consisté à concevoir une interface utilisateur qui permette d'interagir le plus simplement possible avec la base de données MEU de manière à pouvoir :

- i) connecter un bâtiment à une technologie présente dans un autre bâtiment ;
- ii) définir plusieurs technologies, locales ou distantes, qui fournissent un service unique;
- iii) intégrer au système quels sont les quotes-parts de fourniture de service, soit pour un même service fourni à plusieurs bâtiments, pour plusieurs services fournis à plusieurs bâtiments, ou même pour un service fourni par plusieurs technologies.

Une fois ces différents cas caractérisés, les consommations de chacune des technologies présentes dans la zone évaluées, de même que leurs ventilations par bâtiment et services, peuvent être déterminées.

### Use-case scénarios

Les scénarios constituent un élément central de la future plateforme MEU. Le « use-case » correspondant a établi les détails de la gestion des scénarios via l'interface, notamment du point de vue de la création de ces derniers – établissement des propriétés, enregistrement du contenu, introduction des modifications globales, etc. – et de leur gestion en tant que fichiers. Là aussi, le « use-case » décrit des fonctionnalités qui n'ont pas encore été intégralement intégrées sur la plate-forme, pour des questions de priorisation des développements. Néanmoins, l'élaboration de ce « use case » dans sa version complète permet de garantir que l'interface permettra à moyen terme d'intégrer harmonieusement toutes les fonctions imaginées dans le cahier des charges.

### Use-case display des indicateurs

Il s'agissait dans ce « use-case » d'élaborer l'ergonomie qui permettra d'afficher les résultats, notamment en termes d'indicateurs globaux (tableaux) et de cartes thématiques (représentations symboliques en fonction de différents attributs). Ce dernier « use case » a conduit l'équipe de développement à intégrer un onglet « résultat » à la plateforme, de manière à centraliser l'accès à tous les résultats générés.

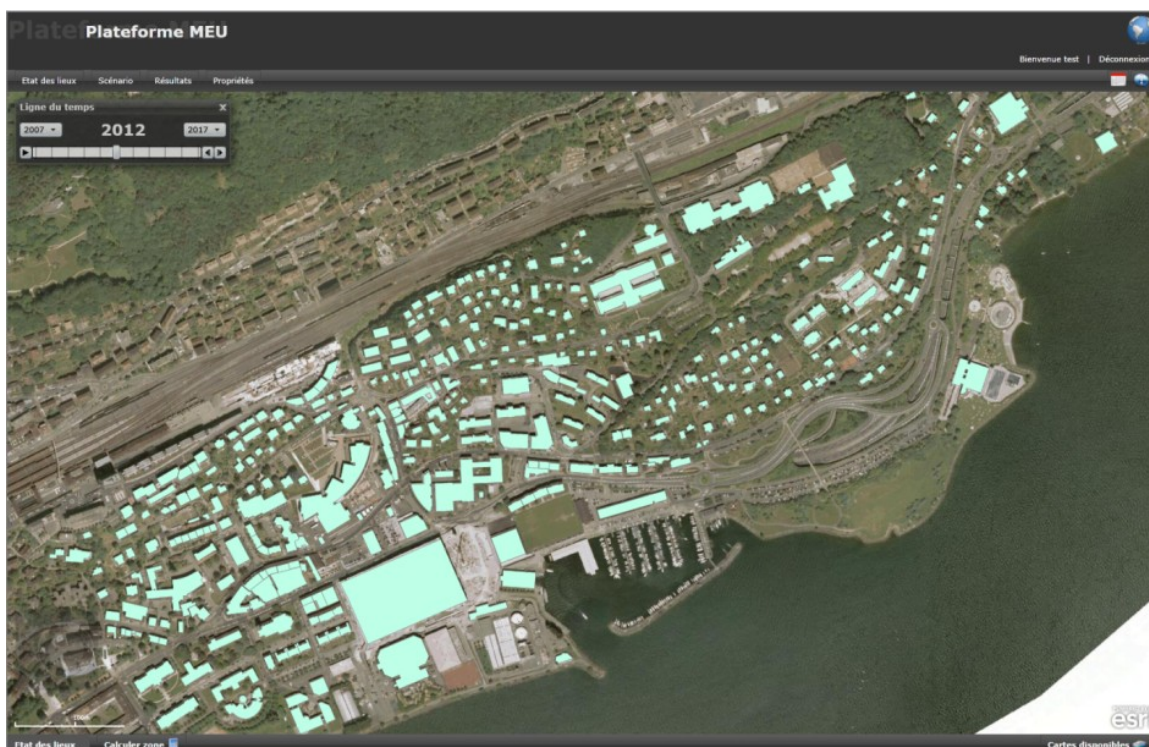
## **2. Présentation de la plate-forme**

La plate-forme MEU est une application web qui est accessible depuis n'importe quel navigateur internet.

### **2.1 Accueil**

Une fois connecté sur la base d'un *username* et d'un *password*, l'utilisateur de la plate-forme arrive sur l'écran ci-dessous.





Il s'agit de l'état des lieux de la ville pour laquelle l'utilisateur possède des droits. On peut identifier les parties suivantes :

- Le menu connexion (en haut à droite) : affiche un message de bienvenue et permet de se déconnecter
- Le menu de navigation (en haut en gauche) : permet de naviguer vers les scénarios (création, ouverture et suppression), de naviguer vers l'état des lieux, d'afficher les résultats sous forme de tableaux de synthèse ou de cartes et, enfin, d'afficher les propriétés du scénario en cours.
- La ligne du temps (au milieu à gauche) : permet de faire apparaître ou de masquer des bâtiments selon l'année affichée dans ce contrôle. La ligne du temps est affichée uniquement lorsque l'utilisateur affiche l'état des lieux.
- La carte (au milieu) : affiche les bâtiments d'une ville. Les empreintes de ces bâtiments dépendent directement des données stockées dans la base de données géographique de la ville. Ces données sont cruciales car une multitude d'informations sont reliées à chaque bâtiment et c'est l'interaction avec cette carte qui va permettre à l'utilisateur d'afficher et de modifier les informations désirées.
- La liste des cartes disponibles (en bas à droite) : permet d'afficher ou de masquer les cartes d'une ville. Les cartes disponibles sont le fond de carte, les empreintes des bâtiments, ainsi que les plans des réseaux de chauffage à distance (CAD) et de gaz naturel. Les différents résultats calculés par la plate-forme sont aussi accessibles en tant que couches à visualiser sur la carte à partir de ce menu (voir plus loin dans ce chapitre).
- Une boîte en bas à gauche informe l'utilisateur sur le contexte dans lequel il se trouve : scénario ou état des lieux.

Lorsque l'utilisateur clique sur un bâtiment, ce dernier est affiché en jaune et une fenêtre s'ouvre pour afficher différentes informations organisées sous forme d'onglets.

## 2.2 Informations d'un bâtiment

### 2.2.1 Attributs

Le premier onglet donne accès à une longue liste d'attributs du bâtiment, dont l'adresse, la SRE, l'affectation et toute une série de paramètres structurels quant aux murs, vitrages, etc. Pour chaque paire attribut/valeur une métadonnée a été attachée et affichée sous la forme d'étoiles :

- « une étoile » signifie que les données ont une mauvaise qualité
- « deux étoiles » représentent une qualité moyenne
- « trois étoiles » correspondent à une bonne qualité
- « aucune étoile » signifie qu'il s'agit de données par défaut

The screenshot displays the 'Plateforme MEU' interface. On the left, there is a map with a yellow building highlighted. A 'Ligne du temps' (Timeline) widget shows the years 2007, 2012, and 2017. The main panel on the right is titled 'R. de la Pierre-à-Mazel 10' and shows a list of attributes with quality indicators (stars). The attributes are categorized into 'Général' and 'Avancé'.

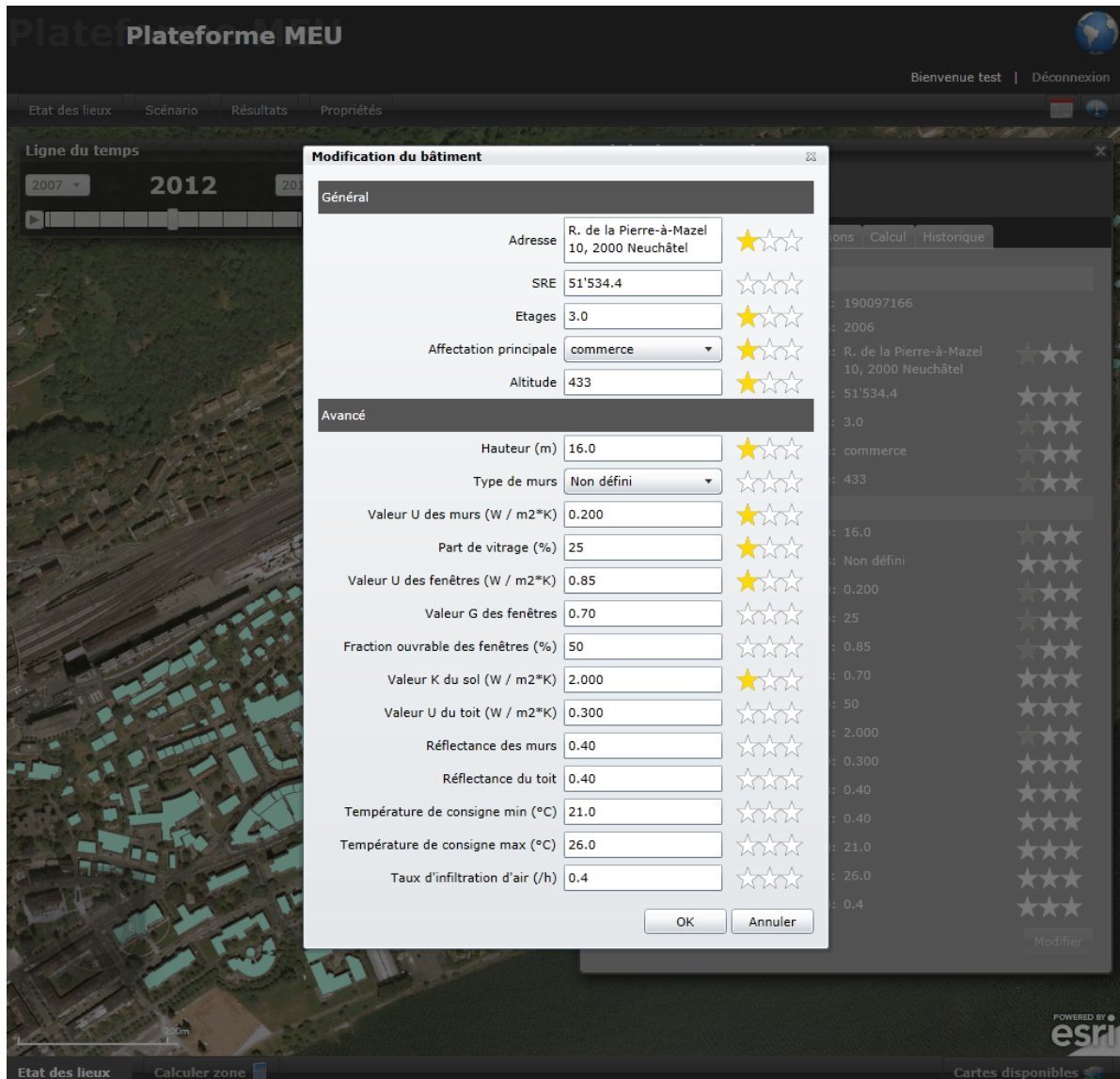
Catégorie	Attribut	Valeur	Qualité (Étoiles)
Général	Identifiant:	190097166	
	Année de construction:	2006	
	Adresse:	R. de la Pierre-à-Mazel 10, 2000 Neuchâtel	★ ★ ★
	SRE:	51'534.4	★ ★ ★ ★
	Etages:	3.0	★ ★ ★ ★
	Affectation principale:	commerce	★ ★ ★ ★
Avancé	Altitude:	433	★ ★ ★ ★
	Hauteur (m):	16.0	★ ★ ★ ★
	Type de murs:	Non défini	★ ★ ★ ★
	Valeur U des murs (W / m <sup>2</sup> *K):	0.200	★ ★ ★ ★
	Part de vitrage (%):	25	★ ★ ★ ★
	Valeur U des fenêtres (W / m <sup>2</sup> *K):	0.85	★ ★ ★ ★
	Valeur G des fenêtres:	0.70	★ ★ ★ ★
	Fraction ouvrable des fenêtres (%):	50	★ ★ ★ ★
	Valeur K du sol (W / m <sup>2</sup> *K):	2.000	★ ★ ★ ★
	Valeur U du toit (W / m <sup>2</sup> *K):	0.300	★ ★ ★ ★
	Réflectance des murs:	0.40	★ ★ ★ ★
	Réflectance du toit:	0.40	★ ★ ★ ★
Température de consigne min (°C):	21.0	★ ★ ★ ★	
Température de consigne max (°C):	26.0	★ ★ ★ ★	
Taux d'infiltration d'air (/h):	0.4	★ ★ ★ ★	

A 'Modifier' button is located at the bottom right of the attribute list. The interface also includes a 'Calculer zone' button and 'Cartes disponibles' at the bottom.

Lorsque l'utilisateur clique sur le bouton « Modifier » un pop-up s'ouvre et force l'utilisateur à saisir ses modifications ou à fermer cette fenêtre pour continuer. Les modifications sont



enregistrées directement dans la base de données (soit dans un état des lieux, soit dans un scénario, selon le contexte dans lequel on se trouve).

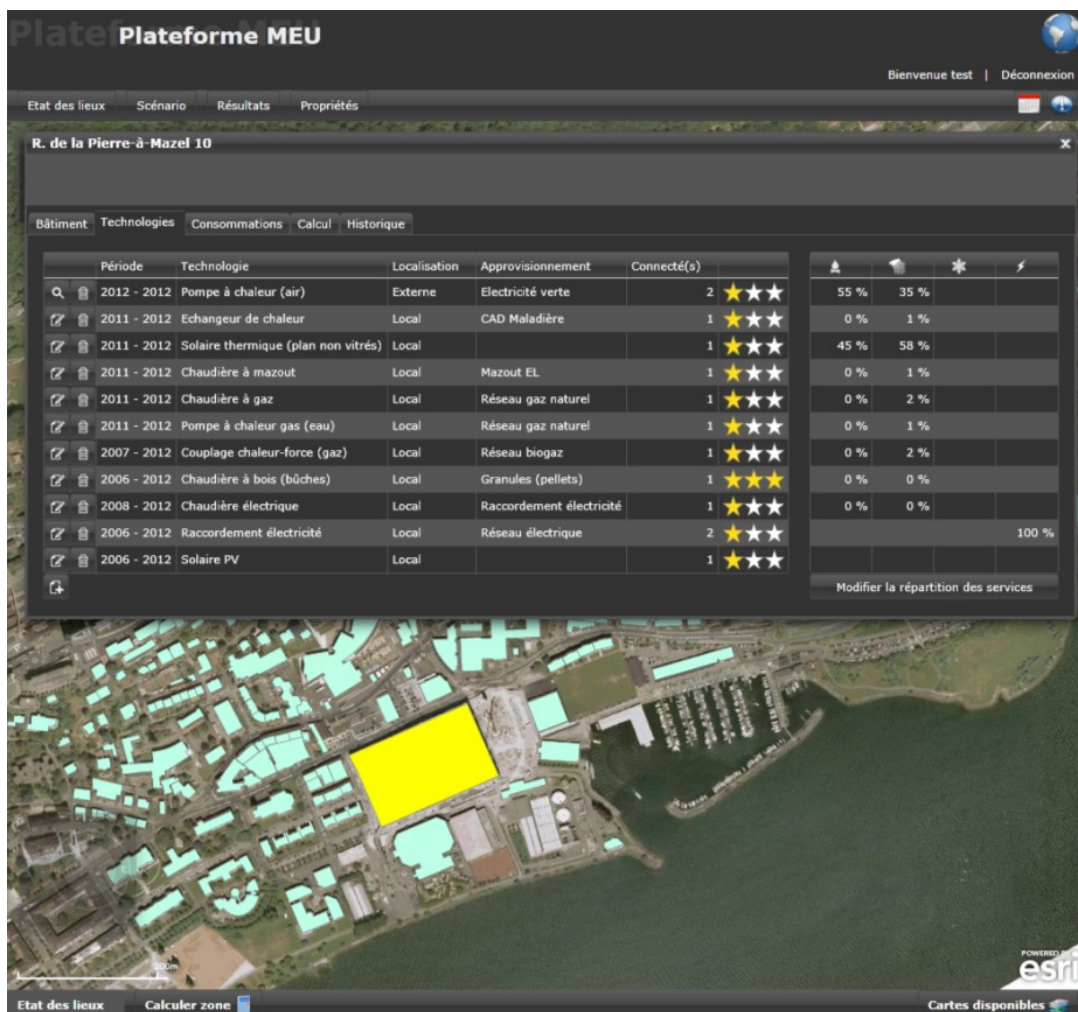


### 2.2.2 Technologies

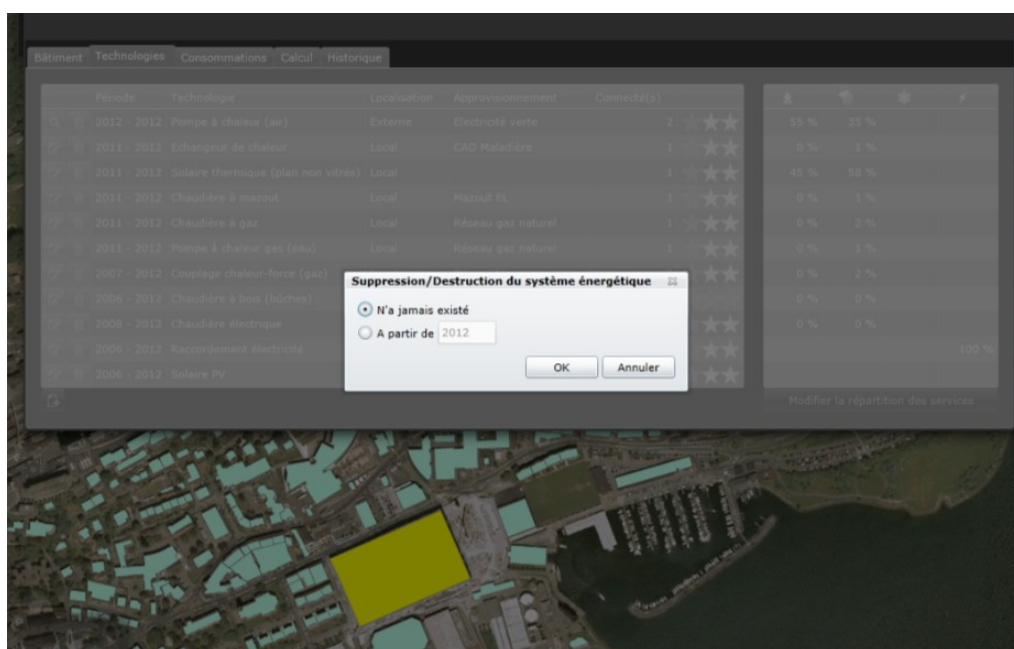
L'onglet « Technologies » affiche toutes les technologies de conversion énergétique présentes dans le bâtiment sélectionné. Elles sont affichées sous la forme d'un tableau indiquant la période pendant laquelle une technologie donnée était installée dans le bâtiment en question, le nom de la technologie, la localisation, le type d'approvisionnement, le nombre de bâtiments connectés à cette technologie et une métadonnée.

Le tableau se situant sur la droite, quant à lui, montre la répartition des services alimentés par les différentes technologies présentes, soit le chauffage, la préparation de l'eau chaude sanitaire, le refroidissement et l'électricité.

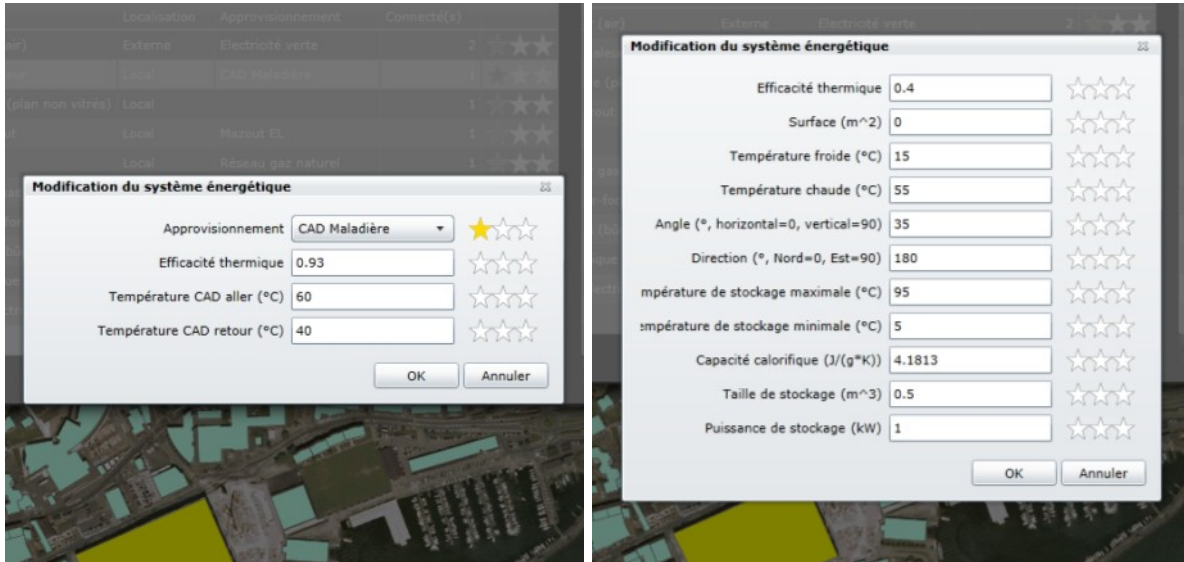




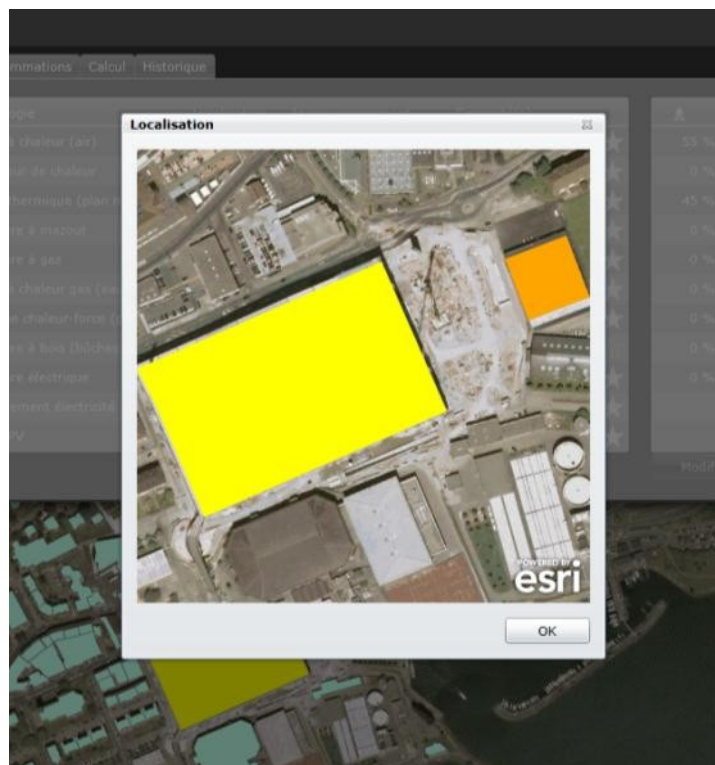
Il est possible de supprimer une technologie. L'utilisateur doit spécifier si le système énergétique n'a jamais existé ou s'il est supprimé à partir d'une année particulière.



Depuis la grille des technologies, il est possible de modifier un système énergétique, à condition qu'il s'agisse d'une technologie locale (sinon il faut y accéder depuis le bâtiment dans lequel se trouve le système énergétique). Dès lors, un pop-up s'ouvre pour permettre la modification des différentes valeurs. Remarquez que les informations affichées sont dynamiques et qu'elles dépendent de la technologie sur laquelle l'utilisateur a cliqué : ci-dessous un exemple d'échangeur de chaleur (à gauche) et de solaire thermique (à droite).

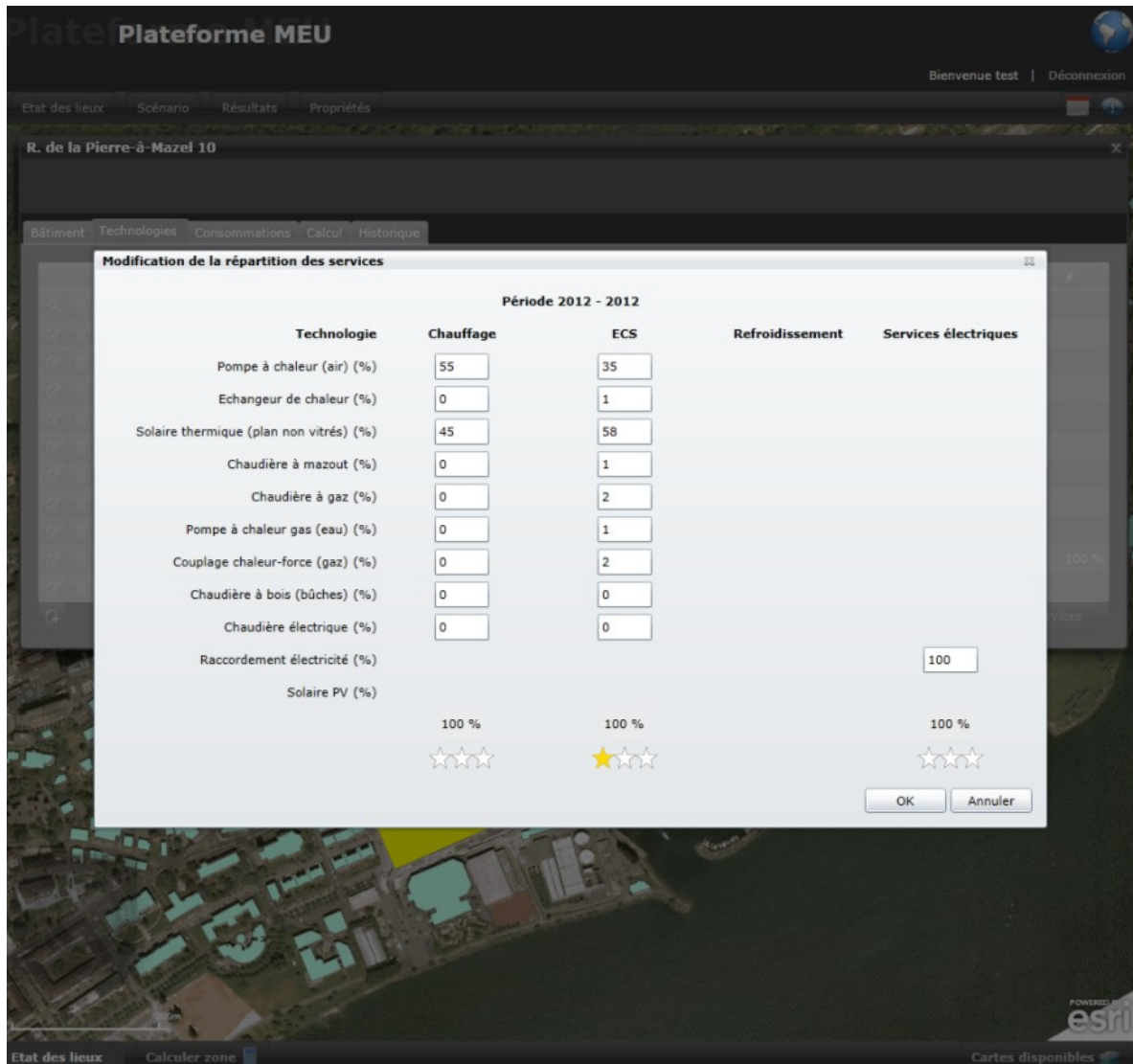


Dans la grille des technologies, celles qui sont externes au bâtiment ne peuvent pas être modifiées. Par contre, elles ont petite icône-loupe qui affiche le pop-up suivant :



Il permet de localiser où se trouve le bâtiment contenant cette technologie (en orange).

Depuis le tableau de répartition des services, il est possible de la modifier, par le biais du pop-up ci-dessous.



Le total de chaque colonne (chauffage, ECS, refroidissement et services électriques) doit être égal à 100%. Il est possible de noter cette répartition grâce aux métadonnées.

### 2.2.3 Consommations

L'onglet « Consommations » présente, à nouveau sous forme de grille, les consommations des différents technologies de conversion énergétique présentes au sein d'un bâtiment (onglet « Technologies »).



Plateforme MEU

Bienvue test | Déconnexion

Etat des lieux Scénario Résultats Propriétés

Ligne du temps R. de la Pierre-à-Mazel 10

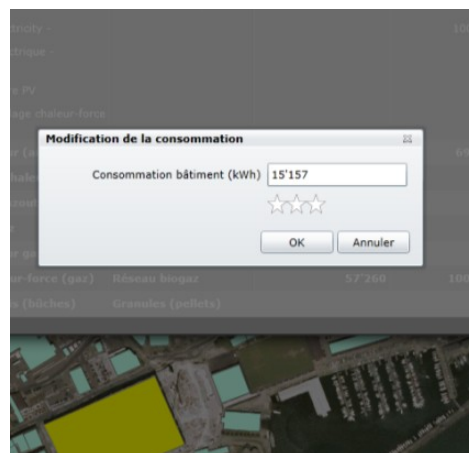
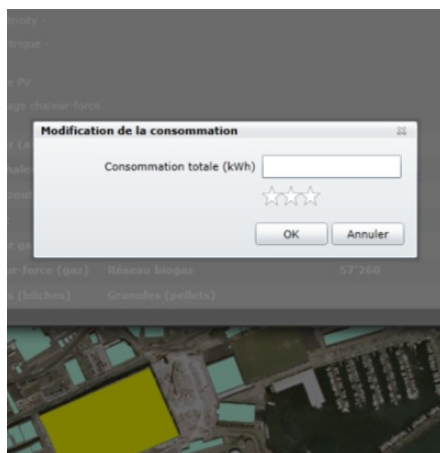
2007 2006 - 2012

Bâtiment Technologies Consommations Calcul Historique

Technologie	Vecteur énergétique	Consommation totale (si centralisée)	Part bâtiment (si centralisée)	Consommation bâtiment	Unité	
<input checked="" type="checkbox"/> Raccordement électricité	Réseau électrique			0	kWh	☆☆☆
services - electricity -			100 %	6'184'134	kWh	☆☆☆
Chaudière électrique - electricity -					kWh	☆☆☆
APPORT Solaire PV				0	kWh	☆☆☆
APPORT Couplage chaleur-force (gaz)				-6'184'134	kWh	☆☆☆
Pompe à chaleur (air)	Electricité verte	2'216'746	69 %	1'529'555	kWh	☆☆☆
<input checked="" type="checkbox"/> Echangeur de chaleur	CAD Maladière			13'853	kWh	☆☆☆
<input checked="" type="checkbox"/> Chaudière à mazout	Mazout EL			15'157	kWh	☆☆☆
<input checked="" type="checkbox"/> Chaudière à gaz	Réseau gaz naturel			30'314	kWh	☆☆☆
<input checked="" type="checkbox"/> Pompe à chaleur gas (eau)	Réseau gaz naturel			8'589	kWh	☆☆☆
<input checked="" type="checkbox"/> Couplage chaleur-force (gaz)	Réseau biogaz	57'260	100 %	57'260	kWh	☆☆☆
<input checked="" type="checkbox"/> Chaudière à bois (bûches)	Granules (pellets)			0	kWh	☆☆☆

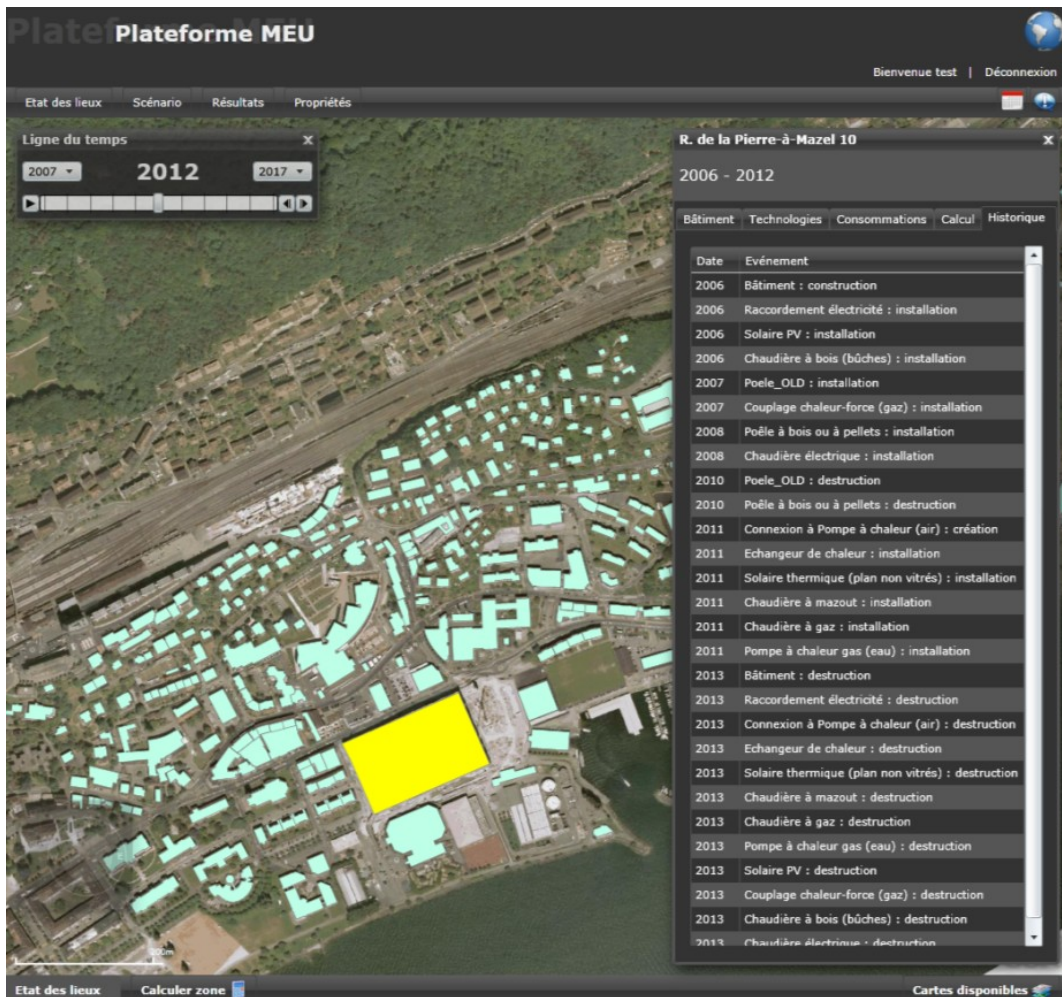
Etat des lieux Calculer zone Cartes disponibles

Dans le cas d'une technologie centralisée, il est seulement possible de spécifier la consommation totale. La part de consommation du bâtiment sera calculée par le solveur CitySim. Dans le cas d'une technologie se trouvant dans le bâtiment en cours d'évaluation, il est par contre possible de saisir manuellement la consommation pour le bâtiment.



## 2.2.4 Historique

L'onglet « Historique » contient une liste de toutes les modifications effectuées sur un bâtiment. Elles sont classées dans un ordre chronologique.

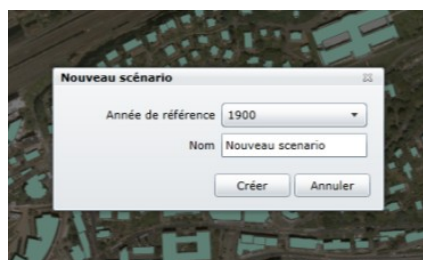


## 2.3 Scénarios

Le menu permet de créer un nouveau scénario, d'ouvrir un scénario existant et de supprimer un scénario.

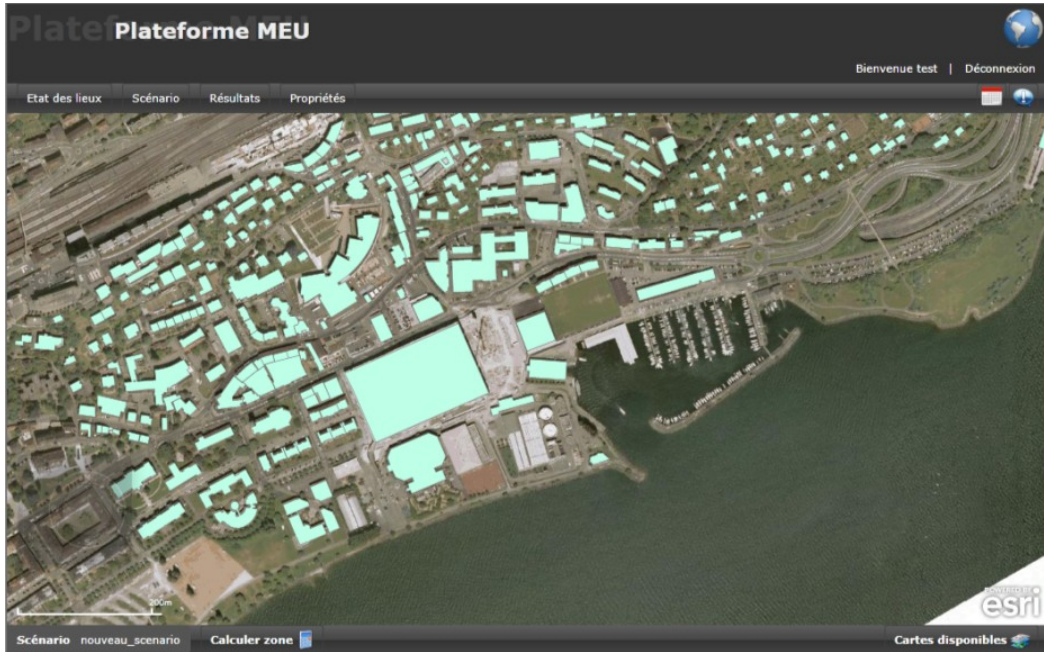
### 2.3.1 Nouveau scénario

Lorsque l'utilisateur veut créer un nouveau scénario, il doit choisir une année de référence et un nom.



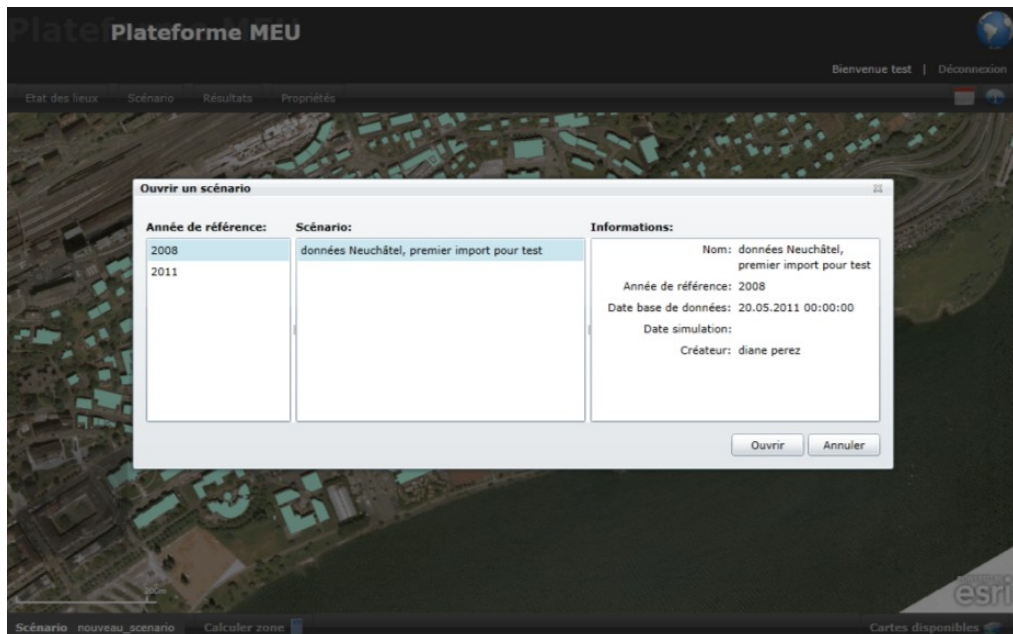


Une fois ces informations saisies, il arrive sur l'écran principal avec les modifications suivantes : la ligne du temps a disparu et le nom du scénario est affiché en bas à gauche. A partir de ce moment, toutes les modifications que l'utilisateur apporte aux bâtiments de la scène (dans chacun des onglets présentés plus haut, i.e. tant du point de vue des attributs du bâtiment lui-même qu'au niveau des technologies de conversion énergétique qui y sont présentes) sont enregistrées dans le nouveau scénario.



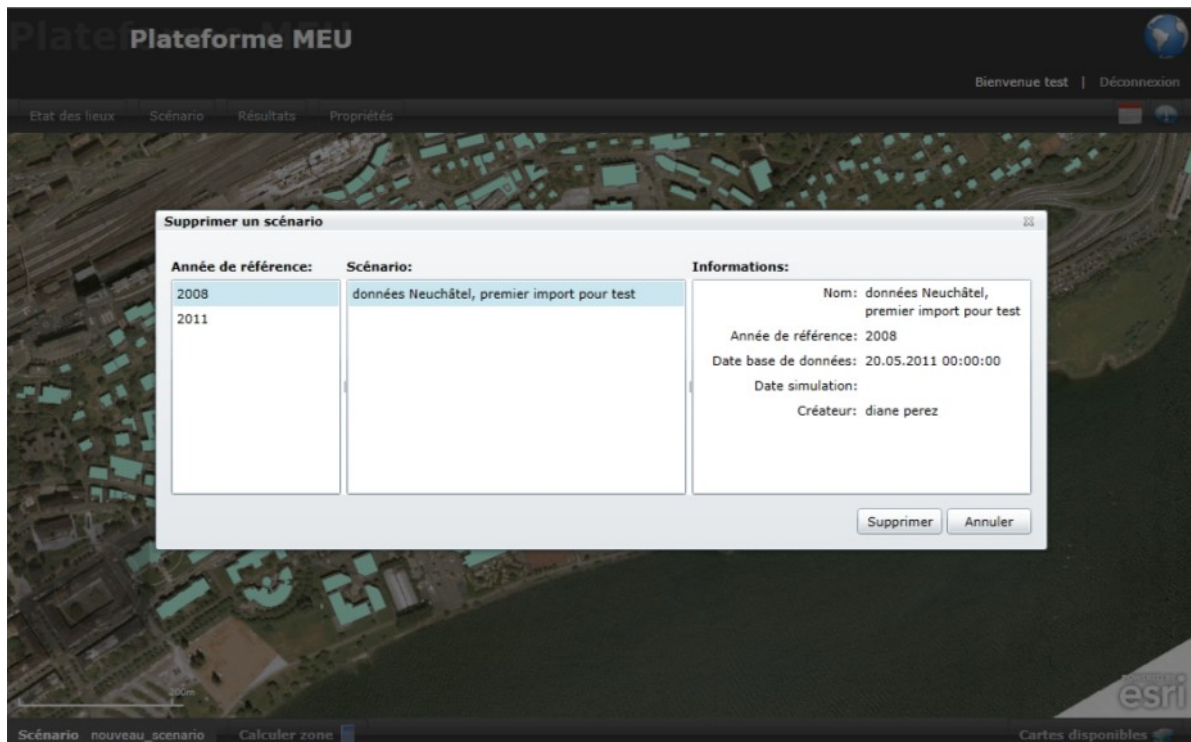
### 2.3.2 Ouvrir un scénario existant

Lorsque l'utilisateur veut ouvrir un scénario, un navigateur de scénarios apparaît. Il présente la liste des scénarios déjà créés, classés par années de références, et affiche quelques informations (nom du scénario, année référence, date de la base de données, date de simulation et le nom de l'utilisateur qui a créé ce scénario).



### 2.3.3 Supprimer un scénario existant

Lorsque l'utilisateur veut supprimer un scénario, le navigateur de scénario s'ouvre à nouveau pour permettre de choisir un scénario et de le supprimer.



## 2.4 Calcul et résultats

### 2.4.1 Calcul

Les solveurs peuvent être lancés en cliquant sur le bouton « Calculer zone » (en bas à gauche). Ceci est valable dans le contexte « Etat des lieux », mais aussi dans « Scénarios ».



### 2.4.2 Résultats

Une fois les calculs effectués, les résultats peuvent être visualisés de 2 manières : sous forme de cartes thématiques ou de tableaux de synthèse.

Les différentes cartes de résultats sont accessibles dans la liste des cartes disponibles (en bas à droite).





Ces cartes de résultats peuvent être masquées/affichées grâce au bouton à cocher situé en face des noms de chacune des cartes. Il est également possible de jouer sur la transparence de chaque carte en utilisant le curseur de défilement.

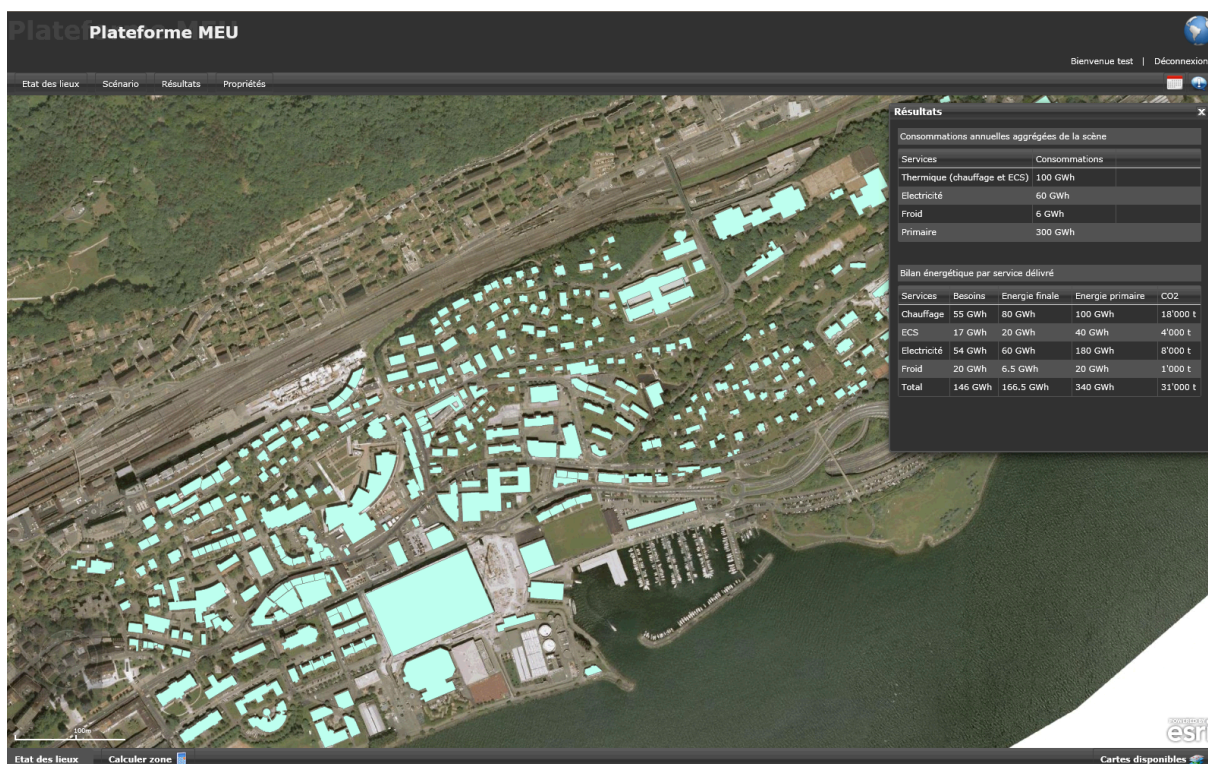
Voici, ci-dessous, la liste des cartes qui seront disponibles, à terme, dans la plate-forme MEU. Les indicateurs écrits en italique n'ont pas encore été implémentés dans le prototype de la plate-forme MEU dans son état actuel (éléments *nice-to-have*).

Carte	Etat des lieux	Scénarios	Symbologie
<b>Vecteur énergétique chauffage</b>	X	X	Couleur du périmètre du bâtiment
<b>Vecteur énergétique ECS</b>	X	X	Couleur du périmètre du bâtiment
<b>Technologie chauffage</b>	X	X	Couleur du périmètre du bâtiment (si plusieurs technologies, choisir la plus importante)
<b>Technologie ECS</b>	X	X	Couleur du périmètre du bâtiment (si plusieurs technologies, choisir la plus importante)
<b>Indice de dépense énergétique chauffage</b>	X	X	Couleur empreinte bâtiment
<b>Indice de dépense énergétique thermique</b>	X	X	Code couleur empreinte bâtiment
<b>Indice de dépense électrique</b>	X	X	Code couleur empreinte bâtiment
<b>Consommation annuelle énergie chauffage</b>	X	X	Cercle centré sur le bâtiment, de diamètre proportionnel à la consommation. La couleur du cercle dépend du vecteur énergétique (cf. couleur périmètre bâtiment)



<b>Consommation annuelle électricité</b>	X	X	Cercle centré sur le bâtiment, de diamètre proportionnel à la consommation. La couleur du cercle dépend du vecteur énergétique (cf. couleur périmètre bâtiment)
<b>Consommation annuelle énergie primaire</b>	X	X	Cercle centré sur le bâtiment, de diamètre proportionnel à la consommation. La couleur du cercle dépend du vecteur énergétique (cf. couleur périmètre bâtiment)
<b><i>Consommation annuelle froid</i></b>	X	X	<i>Cercle centré sur le bâtiment, de diamètre proportionnel à la consommation. La couleur du cercle dépend du vecteur énergétique (cf. couleur périmètre bâtiment)</i>
<b><i>Puissance système de production thermique</i></b>	X	X	<i>Cercle centré sur le bâtiment, de diamètre proportionnel à la consommation. La couleur du cercle dépend du vecteur énergétique (cf. couleur périmètre bâtiment)</i>
<b>Affectation du bâtiment</b>	X		Couleur du périmètre du bâtiment
<b>Panneaux PV installés</b>	X	X	Point jaune
<b>Panneaux solaire thermique installés</b>	X	X	Point rouge

Les indicateurs agrégés qui pourront être calculés par le biais de la plate-forme MEU, tout en ne pouvant pas être présentés sous la forme de carte, peuvent cependant être affichés sous forme de tableaux, en passant par le menu Résultats.



Voici, ci-dessous, la liste des tableaux de synthèse disponibles dans la plate-forme MEU. Les indicateurs agrégés écrits en italique n'ont pas encore été implémentés dans le prototype de la plate-forme MEU dans son état actuel (éléments *nice-to-have*).

Tableau	Etat des lieux	Scénarios	Format
<b>Consommations agrégées de la scène</b>	X	X	Plusieurs lignes pour : thermique (chauffage + ECS), électricité, froid, primaire
<b>Bilan énergétique par service délivré (chauffage, ECS, services électriques, froid, total)</b>	X	X	Cinq colonnes : besoins, énergie finale, énergie primaire, CO <sub>2</sub> et part énergies renouvelables (en pourcent)
<b>Bilan par agent énergétique présent sur la scène</b>	X	X	Quatre colonnes : pourcentage surface chauffée, énergie finale en kWh, énergie primaire en kWh et CO <sub>2</sub> en tonnes
<b>Ratios par agent énergétique présent sur la scène</b>	X	X	Trois colonnes : ratio de la surface chauffée, ratio de la consommation d'énergie primaire totale et ratio des émissions de CO <sub>2</sub> total
<b>Comparaison énergie primaire, CO<sub>2</sub> et part d'énergies renouvelables</b>		X	<i>Comparaison entre le scénario calculé et l'état des lieux (en pourcentage et en kWh/tonne)</i>
<b>Solaire (production annuelle en kWh, nombre d'installations, surface installée)</b>	X	X	<i>Deux lignes : PV et thermique</i>
<b>Bilan Watt/personne et CO<sub>2</sub>/personne</b>	X	X	<i>Attention : nombre d'habitants par scène incontournable</i>

## **IV. Résultats - Projets urbains**

### **1. Introduction générale**

La réalisation de projets urbains est intimement liée à l'approche *bottom-up* qui a été adoptée dans le cadre de MEU. En effet, c'est notamment au travers de la réalisation de ses projets que la connaissance des problématiques énergétiques urbaines a pu être cumulée et précisée, dans un contact direct de partenariat et de collaboration. Dans la plupart des projets urbains, les étudiant(e)s ont été encadrés directement par les délégués à l'énergie des villes-partenaires et/ou par des ingénieurs des entreprises multi-énergie locales; cela a notamment permis de mettre en évidence de manière directe, pour les étudiant(e)s et les laboratoires impliqués, les processus de décision et les contraintes qui existent en milieu urbain quant à la réalisation de projets énergétiques.

Du point de vue du développement de la plate-forme MEU, les projets urbains ont conduit à développer une meilleure compréhension au niveau :

- des données en input à disposition des villes et des multi-distributeurs énergétiques, ainsi que de leurs caractéristiques disparates, avec une claire priorité posée sur des données mesurées;
- des besoins/attentes des villes et des multi-distributeurs énergétiques en termes d'indicateurs et de fonctionnalités associées, telles que les représentations cartographiques;
- de la nécessité d'adapter le design de la plate-forme aux processus décisionnels typiques dans les villes suisses.

Ainsi, les projets urbains représentent une pierre fondamentale de l'édifice MEU, ayant alimenté de manière significative le cahier des charges de la plate-forme.

### **2. Liste des projets urbains**

Un total de douze projets urbains a été réalisé dans le cadre du projet MEU, soit un par an dans chacune des quatre villes-partenaires. D'un commun accord, il a été décidé d'effectuer un tournus entre ces dernières et les partenaires académiques afin de maximiser la connaissance entre les intervenants au projet et d'explorer les diverses compétences en jeu.

Les projets réalisés en 2009 ont été :

Ville partenaire	Partenaire académique	Projet	Etudiant(e)
<b>La Chaux-de-Fonds</b>	CREM	Elaboration d'un concept de rénovation énergétique pour le quartier des Forges	Arnaud Chapuis (Ecole des Mines d'Albi, France)
<b>Lausanne</b>	EPFL - LESO-PB	Evaluation systématique des quartiers durables existants en Europe	Clara Quiroga Soyko (EPFL)
<b>Martigny</b>	HES-SO Valais	Analyse des consommations et définition d'un concept énergétique pour le centre-ville	Yannick Bischoff (HES-SO Valais)
<b>Neuchâtel</b>	EPFL - LENI	Élaboration d'un concept de système énergétique urbain pour le quartier de la Maladière	Guillaume Ridoux (EPFL)

Les projets réalisés en 2010 ont été :

Ville partenaire	Partenaire académique	Projet	Etudiant(e)
<b>La Chaux-de-Fonds</b>	EPFL - LENI	Analyse énergétique d'un quartier et étude d'un réseau de CAD	Olivier Mégel (EPFL)
<b>Lausanne</b>	CREM	Quartier durable des Plaines-du-Loup	Loïc Darmayan (Ecole des Mines d'Albi, France)
<b>Martigny</b>	EPFL – LESO - PB	Application d'un logiciel de simulation de système urbain à un bâtiment de Martigny	Cédric Dorsaz (EPFL)
<b>Neuchâtel</b>	HES-SO Valais	Analyse énergétique globale d'un quartier urbain de Neuchâtel visant l'optimisation énergétique et l'exploitation des synergies disponibles	Ludovic Roussin (Ecole des Mines d'Albi, France)

Les projets réalisés en 2011 ont été :

Ville partenaire	Partenaire académique	Projet	Etudiant(e)
<b>La Chaux-de-Fonds</b>	HES-SO Valais	Planification énergétique du secteur sud-ouest	Mariam Barque (Ecole des Mines d'Albi, France)
<b>Lausanne</b>	EPFL - LENI	Concept énergétique du futur complexe sportif des Prés-de-Vidy	Cédric Dorsaz (EPFL)
<b>Martigny</b>	CREM	Les 3x20 à l'échelle du territoire communal	Loïc Sarret (Ecole des Mines d'Albi, France)
<b>Neuchâtel</b>	EPFL – LESO - PB	Etude d'un réseau de distribution de froid à distance	Nesrine Gharbi (Ecole Centrale Lyon, France)

Tous les rapports des douze projets urbains sont à disposition des partenaires du projet et des organismes de financement.

### 3. Aperçu des résultats principaux

Au-delà de l'importance des projets urbains pour le développement de la plate-forme MEU, ils ont généré des résultats importants *per se*, au niveau des villes-partenaires respectives. Un bref tour d'horizon est présenté ci-après.

#### 3.1 La Chaux-de-Fonds

##### La Chaux-de-Fonds – 2009

Ce projet urbain a visé à élaborer un concept de rénovation énergétique pour le quartier des Forges, à l'horizon 2020. La première partie du travail a consisté à établir un état des lieux des consommations et besoins énergétiques du quartier. 89% des consommations des bâtiments a pu être collecté et cartographié, ainsi que de nombreuses autres données nécessaires à la planification énergétique. En se basant sur le CT SIA 2031, un bilan détaillé des consommations d'énergie primaire et d'émissions de CO<sub>2</sub> du quartier a été établi. Les ressources locales ont été identifiées et qualifiées. Cette analyse montre que, dans l'immédiat, le solaire et le bois sont les principales ressources renouvelables à mettre à profit. Toutefois, les ressources locales en bois sont limitées. Ensuite, les réseaux d'énergie, gaz et CAD, doivent être développés afin de substituer totalement le chauffage au mazout : toutefois des goulets d'étranglement doivent être éliminés. Quatre scénarios, développés conjointement avec le Service de l'énergie de La Chaux-de-Fonds, ont été étudiés, prévoyant la rénovation d'une partie des bâtiments, la densification des réseaux, la production décentralisée d'électricité par des cogénérations à gaz ou à bois et l'installation de panneaux solaires. L'objectif de référence fixé était celui des 3x20, auquel la Métropole Horlogère a adhéré. Les quatre scénarios permettent d'atteindre les objectifs de réduction des émissions, mais seulement deux permettent d'atteindre également les objectifs d'efficacité énergétique. La part d'énergie renouvelable actuelle atteint déjà 26% ! Ces scénarios montrent l'importance des systèmes d'approvisionnement dans les performances énergétiques et environnementales, p.ex. via la mise en place d'équipements de production décentralisée d'électricité. L'assainissement des bâtiments est bien sûr, à terme, indispensable mais n'est pas forcément la première mesure à entreprendre d'un point de vue stratégique. Un outil basé sur ArcGIS et des macros Excel a été développé, permettant, notamment, une visualisation graphique des scénarios élaborés.

##### La Chaux-de-Fonds – 2010

Après la pré-étude du quartier Europan à La Chaux-de-Fonds, le périmètre a été élargi à toute la zone nord-est. La Ville a préparé l'étude avec la recherche de consommations d'électricité et du chauffage. Puis, l'étudiant a procédé au géo-référencement des données de consommations et établi une liste des données manquantes. Les partenaires industriels ont été contactés afin de modéliser leurs besoins en chaleur selon la saison. Suite à cette étude, plus de 90% des besoins thermiques du quartier sont connus. Comme le quartier n'est pas densément construit, il est difficile de connecter tout le quartier au gaz ou au réseau CAD. Afin de connecter la géothermie au CAD dans une perspective à moyen terme, une nouvelle branche du CAD doit toutefois être construite dans le quartier.

La fin du projet a consisté à étudier la meilleure intégration de la géothermie, qui devrait fournir 10 litres/sec à 50°C, selon plusieurs axes :

- Quelles sont les options technologiques (rénovation énergétique incluse) à disposition afin d'utiliser la géothermie en combinaison avec le CAD ?
- Quel serait l'intérêt d'abaisser la température de retour du CAD ?
- Quelles industries et combien de bâtiments pourrait-on connecter sur la nouvelle branche et quelle serait l'influence sur le réseau ?
- Comment peut-on au mieux gérer le surplus de chaleur dans le CAD en été ?

La méthodologie a été développée de manière suffisamment générale, afin d'être facilement réutilisable dans le futur, lorsque les résultats d'une étude géologique viendront remplacer les hypothèses de travail utilisées pour la géothermie.

### La Chaux-de-Fonds – 2011

L'objectif assigné au projet urbain 2011 pour la Ville de La Chaux-de-Fonds a été celui de réaliser un audit énergétique sur 328 bâtiments du quartier sud-ouest de la ville de La Chaux-de-Fonds – adjacent au quartier étudié en 2009 -, en vue d'étendre le réseau CAD. Il était ainsi question d'analyser les consommations énergétiques actuelles du quartier, d'établir les consommations futures du quartier en fonction de différents scénarios d'amélioration et d'étudier les possibilités d'approvisionnement du CAD pour alimenter le quartier en fonction desdits scénarios.

Dans le cadre de ce projet, les consommations réelles de près de 99 % des surfaces chauffées ont été collectées, ce qui est tout à fait remarquable. Les rénovations envisagées permettraient de réduire la consommation et les émissions de CO<sub>2</sub> de 37%. De plus, l'économie ainsi réalisée sur le CAD peut servir à alimenter de nouveaux consommateurs. L'extension du CAD avec rénovations permet d'améliorer le comportement énergétique du quartier si bien que les objectifs 3x20 peuvent être atteints même sans élimination complète des chaudières à mazout présentes dans le quartier.

## **3.2 Lausanne**

### Lausanne – 2009

Ce projet urbain s'est concentré sur l'évaluation des expériences européennes de planification énergétique dans le cadre d'éco-quartiers.

La conception de quartiers durables est une démarche globale qui vise à optimiser la transversalité dans le développement de projets urbains. Tant les aspects sociaux, qu'économiques et environnementaux sont inclus dans cette démarche. La planification énergétique territoriale fait partie intégrante des critères qui sont évalués dans le cadre des quartiers durables. Dans l'optique de tirer profit des expériences existantes, une évaluation des quartiers durables les plus renommés d'Europe (BedZED, UK; Vauban, D; Hammarby, S; Eco-Viikki, N; Bo01, S) a été réalisée. Les résultats de cette étude ont été synthétisés dans des fiches descriptives et ont notamment permis d'élaborer une liste de recommandations.

Parmi les recommandations qui ont un impact direct sur les consommations d'énergies, peuvent être citées : le tracé du site (orientation), l'accès aux transports publics ou la proximité des zones d'activités (travail et loisirs), les prescriptions énergétiques pour les

bâtiments, les systèmes d'approvisionnement et les matériaux de construction utilisés. De plus, il est important de prévoir et de mettre en place un suivi des performances des quartiers (surchauffe des bâtiments, mauvais fonctionnement des systèmes de conversion, etc.), afin de comparer les résultats aux estimations. Ce suivi doit permettre d'assurer l'atteinte des objectifs, d'élaborer et de réaliser des stratégies pour améliorer en continu la gestion des ressources, ainsi que d'informer les planificateurs/concepteurs (rétroaction).

## Lausanne – 2010

La Ville de Lausanne souhaite réaliser un quartier durable situé aux Plaines-du-Loup. Afin de minimiser les consommations d'énergie de ce nouveau lieu de vie, la Municipalité a décidé de lui appliquer le concept de société à 2000 W. Dans le but de satisfaire cet objectif, un concours d'urbanisme pour sa construction a été réalisé.

Une évaluation énergétique des projets d'urbanisme soumis au concours devait être réalisée à l'aide de CitySim (simulation des besoins de chauffage). Pour ce faire, les objectifs suivants ont été déterminés, dans le but d'être opérationnel lors de l'évaluation des candidatures et de vérifier la précision des résultats de l'outil :

- Réalisation d'une simulation globale du quartier des Forges, à La Chaux-de-Fonds (175 bâtiments multi-affectations), grâce à la reprise des résultats du projet 2009.
- Réalisation d'une simulation plus fine du quartier Praz-Séchaud à Lausanne, effectuée sur 14 bâtiments résidentiels dont les données de construction sont connues.

### Simulation du quartier des Forges

Selon les simulations réalisées, on peut conclure que seuls les bâtiments standards peuvent être évalués par CitySim sans visite sur site. Les bâtiments non-standards (industrie, bâtiments à usage spécial) ne peuvent pas être valablement simulés sans études complémentaires. Le fait de ne pas connaître les rendements des systèmes de conversion, très variables suivant les technologies, l'âge et le suivi des installations, introduit une erreur importante pour le gaz et le mazout. Ainsi, les résultats obtenus pour le CAD sont sensiblement meilleurs. Au vu des hypothèses, on constate que CitySim évalue de manière acceptable les besoins d'un quartier d'habitation, avec une erreur moyenne relative de l'ordre de 10 à 15 %.

### Simulation du quartier Praz-Séchaud

Selon les différentes simulations faites, il a été démontré que les résultats obtenus avec CitySim correspondent presque à la réalité quand les données constructives sont connues. Pour une erreur relative moyenne avant visite de terrain de -26.6%, on passe en effet à une erreur relative moyenne après visite de terrain de -6.2%. Résultat complémentaire, entre une simulation 3D et une simulation simplifiée (2.5D, hauteur moyenne) du quartier, on obtient un écart absolu de 2.65% entre les deux simulations. L'écart paraît acceptable étant donné le niveau de complexité et l'économie de temps pour réaliser cette nouvelle simulation 2.5D.

## Lausanne – 2011

Ce projet consistait à réaliser le concept énergétique de futur complexe sportif et multifonctionnel Près-de-Vidy. L'étude se base sur la version finale du programme du concours de la Ville de Lausanne qui définit le cadre du projet. L'analyse des besoins en chaleur du quartier pour différentes échelles temporelles représentant au mieux la réalité (définition des journées-type les plus représentatives) a été effectuée pour différentes catégories de bâtiments, dont le stade, la piscine, etc., suivie d'une analyse des ressources disponibles dans et autour du quartier, dont la STEP de Vidy et le CAD. L'intégration des résultats de ces deux analyses permet de proposer une ou un ensemble de technologies qui vont fournir les services énergétiques nécessaires. Notamment, les solutions faisant appel à des PAC ont été retenues, avec le CAD de Lausanne comme réserve. Cette solution contient également l'utilisation de panneaux thermiques afin de fournir l'ECS et des panneaux PV. En plus, différentes sources de chaleur sont disponibles pour les pompes à chaleur, les plus intéressantes étant l'eau du Lac Léman et l'eau sortant de la STEP de Vidy.

Ce travail a notamment permis de tester la compatibilité entre les logiciels CitySim et EnerGIS en les utilisant ensemble pour la réalisation du concept énergétique. Plusieurs scénarios ont ainsi été étudiés du point de vue de leurs performances énergétique et économique.

Suite au projet, la Ville de Lausanne, a utilisé le logiciel afin d'évaluer les différentes soumissions au concours public, pendant l'été 2011.

### **3.3 Martigny**

#### Martigny – 2009

Sinergy souhaite augmenter le nombre bâtiments raccordés au réseau CAD. Dans ce contexte, l'assainissement des bâtiments les plus gourmands est favorable sous un double aspect : pour les bâtiments déjà raccordés au réseau CAD, une diminution des besoins de chaleur augmente la disponibilité pour les nouveaux raccordements; d'autre part, pour les bâtiments à raccorder, un assainissement évite tout surdimensionnement au niveau des éléments techniques. Sinergy offre donc à ses clients des diagnostics énergétiques avant rénovation. Afin de mettre au point et de tester la méthode, les bâtiments de la régie Getisa (une trentaine d'immeubles d'appartements) ont été analysés sur la base d'une visite sur place ciblant les différents éléments de l'enveloppe (toit, façades, fenêtres, sol) ainsi que la technique (vecteur énergétique utilisé, état des éléments techniques). Dans le cadre de ce projet urbain, il a d'abord été procédé à la mise au point de la méthode d'analyse énergétique et du retour d'information et a réalisé les études pour la régie Getisa.

Lors de ce travail d'analyse énergétique, il a été constaté que des immeubles de la même époque et d'états de conservation comparables affichaient des consommations spécifiques d'énergie de chauffage (énergie de chauffage par m<sup>2</sup> de SRE) sensiblement différents. Un second travail a ensuite permis d'éclairer les raisons de telles différences : par simulation, il a été vérifié que les paramètres d'un bâtiment qui influencent le plus grandement la consommation d'énergie de chauffage sont : i) la valeur U moyenne de l'enveloppe; ii) la surface d'enveloppe; iii) la température de consigne du chauffage (confort thermique intérieur); iv) le rendement du système de production de chaleur.



## Martigny – 2010

Dans le cadre de ce projet, l'étudiant a eu l'occasion d'étudier les résultats obtenus par le logiciel CitySim sur la base du modèle détaillé d'un bâtiment locatif. Les besoins en chauffage simulés ont ensuite été comparés avec des mesures précises de consommation de chaleur. Les possibilités d'amélioration du modèle ont aussi été étudiées.

Les données physiques du bâtiment ont été mesurées, observées ou estimées à partir de visites, valeurs typiques ou de discussions avec les habitants; les données météorologiques ont été extrapolées de MétéoSuisse et les données de consommations obtenues de Sinergy.

Les résultats ont montré que l'utilisation de CitySim avec un premier modèle peu détaillé et non-calibré fournit une estimation des besoins en chaleur qui diffère de moins de 11% des valeurs journalières mesurées sur une année. Le besoin de chaleur total simulé sur une année a pour sa part été surestimé de 5.2%, ce qui montre qu'il est approprié d'utiliser CitySim avec des modèles simples de bâtiments pour estimer leurs besoins en énergie de chauffage. Une analyse de sensibilité sur chacun des paramètres d'entrée de CitySim a mis en évidence une forte influence de la température de consigne intérieure et du taux d'infiltration d'air du bâtiment. En pratique ces deux paramètres sont difficiles à obtenir. Les autres paramètres ont un impact plus faible sur les résultats, ce qui justifie l'utilisation de valeurs default.

A l'aide du programme MatLab, une optimisation a été réalisée sur les paramètres principaux les plus incertains du modèle afin de calibrer la courbe de consommation simulée par CitySim sur la courbe de consommation réelle. Le résultat de cette calibration a permis de réduire l'erreur moyenne à 8.4% sur l'année, mais certaines valeurs des paramètres sont à vérifier.

Enfin, un scénario d'optimisation de performance énergétique et une comparaison avec les exigences Minergie® ont permis d'entrevoir le potentiel d'utilisation d'un tel modèle calibré. La réalisation de ce travail a en outre mis en évidence des lacunes de CitySim qui ont ainsi pu être corrigées. Une période de préchauffage a été ajoutée avant la période simulée pour éviter les erreurs dues aux températures initiales attribuées aux murs et bâtiments. La période de coupure du chauffage en été peut désormais aussi être spécifiée. Finalement, les pertes d'énergie par le sol sont maintenant aussi simulées par CitySim.

## Martigny - 2011

La Ville Martigny, en partenariat avec le multi-distributeur local Sinergy, est signataire de la Convention des Maires. De ce fait, la municipalité s'est engagée à dépasser les objectifs des 3x20 européens, d'ici 2020 et à l'échelle de son territoire. Ce projet urbain a ainsi eu pour double objectif de réaliser un cadastre énergétique à l'échelle de la ville et de définir quelles mesures peuvent être mises en place et pour quels résultats.

La première partie du travail réalisé a consisté à réaliser une passerelle informatique entre les données de consommations d'énergie (électricité, gaz, CAD) disponibles auprès du fournisseur d'énergie local et un système d'information géographique. La précision de la base obtenue est de l'ordre de 90% et la carte, ou cadastre énergétique, est automatiquement mise à jour. Ensuite, des modèles de calcul statistiques ont été tirés des grandeurs mesurées pour estimer les consommations des bâtiments chauffés au mazout et au bois.

La deuxième partie du travail a consisté à élaborer des scénarios énergétiques pour atteindre l'objectif des 3x20. Différentes mesures ont été caractérisées dont l'introduction d'une chaudière à bois sur le réseau CAD, la rénovation des bâtiments gros consommateurs et peu efficaces, l'installation de nombreux panneaux solaires thermiques et photovoltaïques, etc. De même, une estimation de l'impact des mesures déjà mises en œuvre à Martigny (installation du CAD) a pu être réalisée, de manière à estimer les gains déjà obtenus depuis 1990.

### 3.4 Neuchâtel

#### Neuchâtel – 2009

L'outil informatique EnerGIS a été appliqué au quartier de la Maladière à Neuchâtel, soit à un ensemble d'environ 300 bâtiments à affectation mixte. Une base de données GIS a d'abord été construite, à partir des données disponibles dans le REG BL de l'OFS; elle a été ensuite enrichie sur la base des données des consommations des énergies de réseau (gaz naturel et CAD) fournies par Viteos et validées par le délégué à l'énergie de la Ville de Neuchâtel. Des données supplémentaires quant à la localisation des réseaux, ainsi que sur les sources locales d'énergies renouvelables (bois et lac) ont été collectées. Des technologies de conversion énergétique ont ensuite été modélisées, afin d'étudier l'intégration énergétique d'options CCF sur les trois réseaux CAD existants. La substitution partielle du gaz naturel par le bois produit localement afin d'alimenter des chaudières centralisées, ainsi que la possibilité d'utiliser l'eau du lac pour du rafraîchissement direct et pour des pompes à chaleur ont été étudiées, de même qu'un scénario de rénovation de bâtiments.

Le logiciel CitySim a ensuite été appliqué au même quartier, afin d'identifier les adaptations nécessaires pour l'appliquer à l'échelle d'un quartier, ainsi que ses limitations. Plusieurs modifications, en particulier à l'interface graphique, ont été apportées. Des fonctionnalités permettant l'importation d'un modèle à grande échelle ont été développées : il est désormais possible d'importer des géométries de bâtiments sur la base de leur empreinte et de leur hauteur (format .kml et .dxf), et d'y joindre d'autres données (p.ex. : époque de construction) sous forme d'un fichier texte (.csv).

#### Neuchâtel – 2010

Une étude thermique de 434 bâtiments situés au sein du quartier de la Maladière à Neuchâtel, préalablement recensés par l'EPFL, a fourni pour cette étude toute une série de données à caractère descriptif (dimensions, consommations, ...). L'objectif du projet était de mettre en évidence des synergies et des potentiels d'amélioration au sein des bâtiments et du quartier.

Une partie de l'étude s'est concentrée sur un certain nombre de bâtiments atypiques, gros consommateurs ou consommateurs particuliers:

- Piscines du Nid-du-Crô

<b>Installation couverture piscine</b>	1 350 MWh / an
<b>Capteurs solaires</b>	1 475 MWh / an
<b>Récupérateur de chaleur sur eaux usées</b>	Dépend de l'installation

- Patinoires du Littoral - La quantité d'énergie récupérable a été estimée à 460 MWh, voire plus avec réfection des bâtiments (isolation, vitrage). L'installation d'un revêtement à faible émissivité sur le plafond a notamment été recommandée.
- Complexe de la Maladière – Les données étaient insuffisantes pour l'établissement de l'étude; une première analyse a toutefois suggéré des pistes pour réduire la consommation.
- D'une manière plus large, les synergies envisagées et chiffrées ont été :
- Raccordement des complexes piscines et patinoires au réseau CAD pour en lisser la charge. Toutefois, les distances des complexes au réseau semblent trop importantes.
- Création d'un sous-réseau entre le complexe de la Maladière, la patinoire et la STEP.

<b>Besoin actuel de chauffage de la Maladière</b>	1 650 MWh/an
<b>Energie de froid extraite des patinoires potentiellement récupérable</b>	1 230 MWh/an
<b>Energie excédentaire de la STEP</b>	140 MWh/an

### Neuchâtel – 2011

Comme en 2009 et en 2010, le projet urbain 2011 pour la Ville de Neuchâtel s'est concentré sur le quartier de la Maladière. L'objectif était de procéder à l'étude d'un réseau de distribution de froid à distance – *free cooling*. Le travail se base sur un projet actuellement à l'étude et consiste à évaluer la demande en froid de la zone concernée, à proposer une structure de réseau adaptée et à étudier les autres opportunités offertes par le réseau de froid.

Dans le cadre de ce projet, il a été procédé à une analyse des besoins en froid de quelques gros consommateurs – notamment en utilisant des fonctionnalités avancées de CitySim –, sur la base d'estimations mensuelles fournies par ces derniers, en plus d'une étude des besoins potentiels des bâtiments administratifs à proximité, dans une optique de densification du réseau. La sensibilité des demandes en refroidissement simulées par CitySim en fonction des différents paramètres a été analysée.

Une étude détaillée des besoins de froid du Centre multifonctionnel de la Maladière a été réalisée. L'analyse a notamment permis de se rendre compte de la difficulté d'évaluer les besoins de froid pendant la période hivernale, alors que d'excellents résultats sont obtenus pour les périodes plus chaudes. Le besoin en froid de l'Hôpital Pourtalès, dont la connexion au réseau de free cooling est prévue, a aussi été simulé et étudié. De plus, les autres bâtiments susceptibles d'être raccordés au réseau ont été identifiés et leurs besoins quantifiés. Lorsque la consommation de chauffage de ces différents bâtiments était connue, celle-ci a été utilisée pour calibrer le modèle CitySim des bâtiments et ainsi améliorer les estimations du besoin en froid. Cette étude a ainsi confirmé que le futur réseau de free cooling pourra être raccordé à plusieurs autres bâtiments présents dans le quartier de la Maladière, en sus des gros consommateurs (Microcity, etc.), déjà prévus initialement.

## V. Évaluations du projet 2011 et perspectives pour le futur (2012)

### 1. Rapport financier

Le projet MEU a bénéficié du soutien financier de l'OFEN, de la FOGA, ainsi que des quatre villes-partenaires. De même, l'Energy Center de l'EPFL et le CREM ont apporté des contributions financières propres. Tous les détails relatifs aux financements et aux dépenses engagées au titre du projet sont accessibles en tout temps aux organismes finançant le projet et aux villes-partenaires. Un rapport financier détaillé séparé a ainsi été préparé.

### 2. Ressources humaines financées par le biais du projet MEU

Par le biais du projet MEU, comme illustré par le bilan financier présenté ci-dessus, il a été possible de compter sur une équipe de projet composée d'ingénieurs de l'EPFL et d'autres institutions de recherche.

Ressources humaines financées par le biais du projet MEU		
Collaborateur (-trice)	Période de travail	Rôle
<i>Massimiliano Capezzali</i>	Octobre 2008 – Décembre 2011	Chef de projet (EPFL Energy Center)
<i>Gaëtan Cherix</i>	Octobre 2008 – Décembre 2011	Responsable des développements techniques et du groupe de travail (CREM)
<i>Diane Perez</i>	Avril 2009 - Décembre 2011	Doctorante (EPFL LESO-PB)
<i>Luc Girardin</i>	Janvier 2009 – Décembre 2010	Doctorant (EPFL LENI)
<i>Jakob Rager</i>	Janvier 2011 – Décembre 2011	Doctorant (EPFL LENI)
<i>Arnaud Chapuis</i>	Eté 2009	Ingénieur (CREM)
<i>Clara Quiroga Soyko</i>	Printemps – Eté 2009	Etudiante Master (EPFL LESO-PB)
<i>Nesrine Gharbi</i>	Mai 2010 – Juillet 2010	Etudiante stagiaire (EPFL LESO-PB)
<i>Renaud Sauvain</i>	Hiver2010 - Printemps 2011	Etudiant Master (EPFL Energy Center)
<i>Mathias Cudilliero</i>	Printemps 2011	Civiliste (CREM et EPFL LENI)
<i>Stéphane Restani</i>	Juillet 2011 - Décembre 2011	Civiliste et assistant-étudiant

Tableau 13 – Collaborateurs(-trices) financé(e)s par le projet MEU. Les personnes indiquées en italique n'ont été financées que de manière partielle.

Par ailleurs, le projet MEU a pu compter sur l'encadrement de personnel de l'EPFL, de la HES-SO Valais et du CREM, partiellement financé par le projet MEU. Pour l'EPFL, les personnes suivantes ont participé à l'encadrement des étudiant(e)s et au suivi scientifique du projet :

- Prof. Hans Björn Püttgen, Energy Center
- Prof. Matthias Finger, Chaire MIR

- Dr. François Maréchal, EPFL LENI
- Dr. Darren Robinson, ex-EPFL LESO-PB
- Dr. Jérôme Kämpf, EPFL LESO-PB
- Dr. Massimiliano Capezzali, EPFL Energy Center

A la HES-SO Valais, l'encadrement scientifique a été assuré par :

- Prof. Michel Bonvin, ISI
- Prof. Jean-Pierre Rey
- Prof. Jean Hennebert, ex-IIG

La supervision scientifique des étudiants Master engagés au CREM a été assurée par

- M. Gaëtan Cherix
- M. Loïc Darmayan

Un décompte précis et détaillé en termes d'heures de travail a été présenté dans les rapports semestriels soumis aux entités de financement du projet.

### **3. Perspectives pour la plate-forme MEU en 2012 et au-delà**

Pendant l'année 2012, le projet MEU 2012, qui sera entièrement financé par les villes et entreprises multi-énergies partenaires du projet MEU original en plus de la Fondation The Ark Energy du Canton du Valais, permettra notamment de réaliser :

- a. des tests détaillés sur la base de données réelles relatives aux quatre villes, qui auront été préalablement importées et réconciliées dans la plate-forme MEU;
- b. la consolidation de l'architecture informatique et de l'interaction entre ses multiples modules, permettant la transition du prototype à l'outil informatique en production;
- c. la mise en service de fonctionnalités supplémentaires mineures, notamment du point de vue de la gestion de la temporalité des données et d'options avancées pour la construction de scénarios.

Parallèlement, un important effort de formation des futurs utilisateurs et futures utilisatrices sera organisé. Le financement du projet MEU 2012 est assuré en grande partie.

Ainsi, à la fin de l'année 2012, la plate-forme informatique MEU permettra, de manière fiable et sur base entièrement interactive et cartographique, de visualiser, quantifier et comparer tant l'état des lieux énergétique d'une zone urbaine donnée à une période donnée que différents scénarios modifiant ledit état des lieux du point de vue de la demande énergétique du territoire et de son approvisionnement énergétique (électricité, gaz naturel, CAD et froid). Au travers de la collaboration avec les villes et entreprises partenaires durant la progression du projet MEU, il est apparu que la mobilité représente un élément crucial dans le cadre des actions énergétiques entreprises, notamment en vue de l'atteinte des objectifs 3x20 auxquels toutes les villes-partenaires ont adhéré. L'inclusion future de cette thématique dans la plate-forme représente donc clairement un souhait des villes. Il en va de même dans le domaine des réseaux multi-énergies, qui sont appelés à se développer en milieu urbain – notamment ceux alimentés par des énergies renouvelables – et que les délégués à l'énergie

souhaitent pouvoir planifier/dimensionner en fonction des scénarios développés sur l'outil MEU. Enfin, une visualisation aussi complète que possible des bâtiments (modèles 3D) et une gestion globale de ces derniers représenterait une ultérieure valeur ajoutée du point de vue de l'utilisabilité de la plate-forme.

Ainsi, l'Energy Center de l'EPFL et le CREM ont déposé un projet auprès de l'OFEN et de la FOGA, appelé MEU+, qui permettra d'initier le travail de recherche quant à ces problématiques soulevées et à leur traitement par le biais d'un outil tel que la plate-forme MEU. Les deux premières parties de MEU + sont de nature méthodologique et se situent clairement en amont d'une possible implémentation informatique qui, par contre, pourra être envisagée pour la troisième partie. Toutefois, les trois parties du projet sont unies par une volonté d'enrichissement thématique et fonctionnel de la plate-forme MEU, dont le prototype sera mis à disposition des partenaires à la fin de l'année 2011.

La première partie se concentrera sur l'impact énergétique de la mobilité individuelle et publique dans une zone urbaine. Il est attendu de pouvoir identifier les indicateurs pertinents pour mesurer cet impact, ainsi que de définir des méthodologies de récolte de données et de calcul pour pouvoir les quantifier précisément. La visualisation de ces indicateurs sur base cartographique représente aussi un défi.

La deuxième partie du projet vise à donner la possibilité, au travers de la plate-forme et de son interface interactive, d'adapter les réseaux tant à la demande existante qu'à celle future prévue au sein de scénarios. Il est donc prévu de pouvoir se libérer de l'approche statique des réseaux qui caractérise jusqu'ici les fonctionnalités MEU, en direction d'une vue dynamique (flux maximaux, dimensions, températures, etc.), voire d'interaction cartographique directe (dessin de réseaux). Cette deuxième partie devra notamment permettre d'évaluer l'impact sur les performances énergétiques de la zone évaluée du déploiement d'infrastructures collectives d'énergie (du type de réseau de chaleur moyenne température permettant la consommation et/ou l'injection d'énergie thermique)

La troisième partie du projet devra conduire à la possibilité d'interagir directement depuis l'interface de la plate-forme MEU avec les géodonnées (points, lignes, polygones) contenues dans la base de données. Cette nouvelle fonctionnalité permettra, par exemple, d'ajouter des bâtiments sur une scène représentant une zone urbaine sur la plate-forme MEU, de dessiner et d'enregistrer des zones d'influence de ressources énergétiques, de définir un tracé de réseau urbain, etc.. De même, les possibilités de dessin et de visualisation 3D des bâtiments seront étudiées, en interface avec des logiciels spécialisés dans ce domaine spécifique (import-export). Il sera ainsi possible de mieux cerner l'intégration des énergies renouvelables sur les bâtiments.

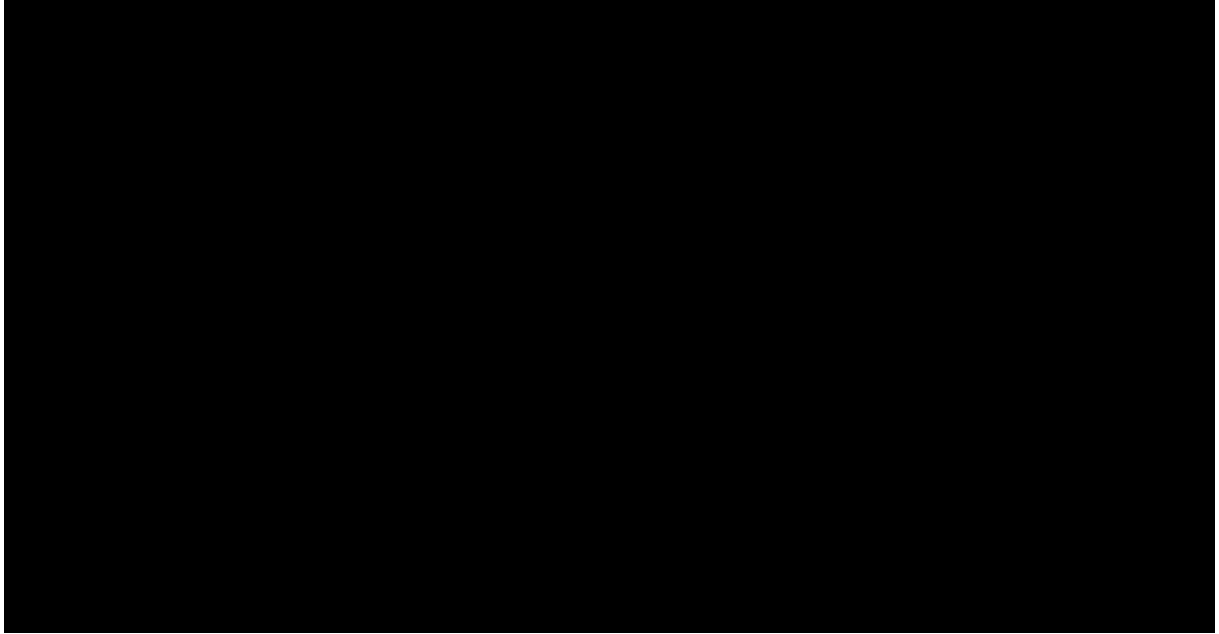
A l'heure de la rédaction de ce rapport, aucune décision quant au financement de ce projet n'a encore été communiquée à l'équipe de projet.

## **VI. Annexe**

### **A. Valeurs par défaut**

#### **A.1 Modèles de technologie**

Le tableau suivant représente la liste des modèles de technologie disponibles, leurs paramètres et les valeurs par défaut de ces paramètres.



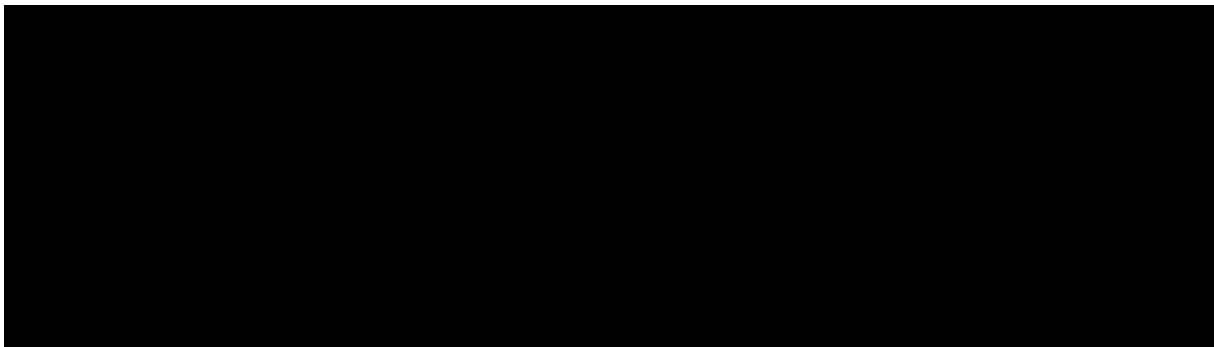
Technologie	Type	Source par défaut	Paramètre	Unité	Valeurs		
					défaut	min	max
Solaire thermique (plan non vitrés)	solar_thermal		Angle	°	35	0	90
			Capacité calorifique	J/(g*K)	4.1813	0	16
			Direction	°	180	0	360
			Efficacité thermique		0.4	0	1
			Puissance de stockage	kW	1	0	100
			Surface	m <sup>2</sup>	0	0	Infinity
			Taille de stockage	m <sup>3</sup>	0.5	0	100
			Temp. chaude	°C	55	0	150
			Temp. de stockage max	°C	95	0	200
			Temp. de stockage min	°C	5	0	200
			Temp. froide	°C	15	0	150
Solaire thermique (plan vitrés)	solar_thermal		Angle	°	35	0	90
			Capacité calorifique	J/(g*K)	4.1813	0	16
			Direction	°	180	0	360
			Efficacité thermique		0.5	0	1
			Puissance de stockage	kW	1	0	100
			Surface	m <sup>2</sup>	0	0	Infinity
			Taille de stockage	m <sup>3</sup>	0.5	0	100
			Temp. chaude	°C	55	0	150
			Temp. de stockage max	°C	95	0	200
			Temp. de stockage min	°C	5	0	200
			Temp. froide	°C	15	0	150





## **A.2 Ressources et données de bilan**

Lors du calcul des bilans, on détermine d'abord la quantité utilisée de chacune des "ressources" ci-dessous (il s'agit en réalité du niveau de détail le plus élevé auquel on puisse accéder, des mix énergétiques sont donc aussi disponibles ici). Les résultats en énergie primaire, énergie primaire non renouvelable, points de pollution environnementaux et émissions de gaz à effet de serre sont calculés sur la base de ce tableau.



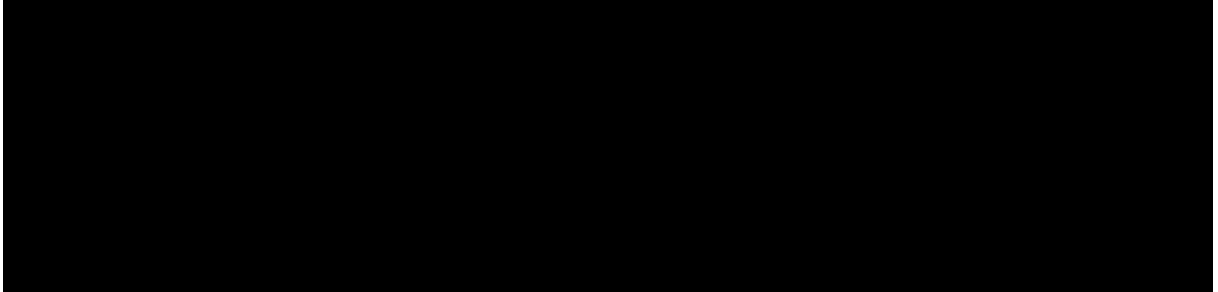
Ressource	Type	Vecteur	Code interne	Énergie primaire kWh/kWh <sub>final</sub>	Émissions de gaz à effet de serre kgCO <sub>2,eq</sub> /kWh <sub>final</sub>	Points de pollution environnementale UBP (KBOB)	Énergie primaire non renouvelable kWh/kWh <sub>final</sub>
Centrale à cogénération, biogaz agricole	fossil			0.19916	0.180909	218.094	0.16315
Centrale à cogénération, bois	solar			3.8021	0.113654	283.985	0.15187
Centrale à cogénération, diesel	fossil			3.3596	0.833315	513.026	3.3461
Centrale à cogénération, gaz	fossil			3.2916	0.736901	399.99	3.2827
Centrale à cogénération, géothermie	solar			3.3601	0.0309031	169.921	0.19123
Centrale au charbon	fossil			4.0207	1.23738	630.216	3.9893
Centrale combinée gaz naturel G+V	fossil			2.3364	0.485456	265.634	2.3293
Centrale nucléaire	fossil			4.0732	0.0162441	552.255	4.0674
Centrale, pétrole	fossil			3.8463	0.997739	929.795	3.8337
Chauffage à distance de l'incinération des ordures, moyenne réseaux CH	fossil	heat		0.813739	0.16348	86.9756	0.80432
Chauffage à distance, moyenne réseaux CH	fossil	heat		0.854388	0.16034	89.4155	0.79554
Coke de houille	fossil	coal		1.6889	0.433007	397.063	1.6776
Energie éolienne	solar			1.3197	0.0271706	87.8913	0.10129
Energie éolienne locale	solar			1.1579	0.0174753	33.9647	0.072996
Energie hydraulique	solar			1.223	0.0126201	62.0758	0.034826
Gaz naturel	fossil	gas	default_gas	1.1177	0.237012	113.406	1.1141
Granules (pellets)	solar	wood	default_pellets	1.2226	0.0367572	100.005	0.20989
Incinération des ordures ménagères	fossil			0.022989	0.00760013	49.8542	0.019537

Ressource	Type	Vecteur	Code interne	Énergie primaire kWh/kWh <sub>final</sub>	Émissions de gaz à effet de serre kgCO <sub>2,eq</sub> /kWh <sub>final</sub>	Points de pollution environnementale UBP (KBOB)	Énergie primaire non renouvelable kWh/kWh <sub>final</sub>
Mazout EL	fossil	oil_fuel	default_oil_fuel	1.2385	0.297691	159.782	1.2306
Mix consommateur CH	fossil		default_electricity_mix	3.051	0.14856	450.595	2.635
Mix de production CH	fossil			2.4104	0.0298676	272.416	1.7565
Mix UCTE	fossil			3.54	0.594514	638.883	3.3207
Particules de bois	solar	wood		1.1438	0.0110831	97.5935	0.063598
Photovoltaïque	solar			1.6597	0.0924955	182.598	0.3935
Photovoltaïque local	solar			1.4615	0.0758069	118.531	0.33392
Photovoltaïque façade	solar			1.7916	0.116045	220.49	0.50619
Photovoltaïque façade local	solar			1.573	0.0964483	151.759	0.43282
Photovoltaïque toiture inclinée	solar			1.5935	0.0801084	163.526	0.337
Photovoltaïque toiture inclinée local	solar			1.4024	0.0647456	101.502	0.28348
Photovoltaïque toiture plate	solar			1.5888	0.0784132	152.063	0.33149
Photovoltaïque toiture plate local	solar			1.3981	0.0632318	91.2661	0.27855
Propane/butane	fossil	gas		1.1827	0.280182	141.466	1.1763

### A.3 Réseaux par défaut

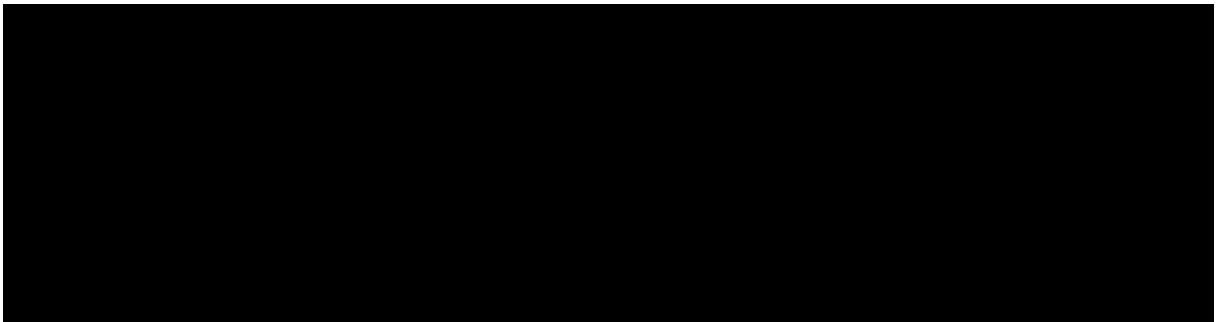
Les systèmes énergétiques peuvent être connectés par défaut sur des réseaux (Réseau électrique, Réseau gaz naturel, Réseau CAD). Pour maintenir la cohérence de la base de données, ces réseaux sont définis par défaut selon le tableau suivant. Ces définitions de réseaux seront dans le futur accessibles et modifiables par l'utilisateur, pour se rapprocher

de la réalité locale. Le terme rendement source permet dans une première approche de tenir compte du rendement des installations fournissant le réseau (si la source est bois, par exemple). Les sources font référence aux ressources définies à la section précédente. Un réseau peut avoir un nombre strictement positif quelconque de ressource (cf. fraction source).



#### **A.4 Types de mur**

Types de mur prédéfinis pour les simulations CitySim tenant compte de l'inertie des murs (l'inertie ne peut pas être simulée lorsque les murs sont définis par une valeur U seulement).



Nom du type de mur	Valeur U [W/m <sup>2</sup> .K]	Couche	Épaisseur [m]	Matériau	Conductivité [W/m.K]	C <sub>p</sub> [J/kg.K]	Densité [kg/m <sup>3</sup> ]
Bale_1961-1970	0.854	1	0.02	render	0.87	1100	1800
		2	0.15	hollowBrick	0.47	900	1200
		3	0.02	polystyrene15kgm3	0.042	1400	15
		4	0.08	hollowBrick	0.47	900	1200
		5	0.01	plaster	0.58	900	1200
Bale_1971-1980	0.492	1	0.01	render	0.87	1100	1800
		2	0.08	hollowBrick	0.47	900	1200
		3	0.06	polystyrene60kgm3	0.04	600	60
		4	0.08	hollowBrick	0.47	900	1200
		5	0.01	plaster	0.58	900	1200
Bale_1981-1990	0.392	1	0.01	render	0.87	1100	1800
		2	0.1	concreteBlock	0.7	1100	1200
		3	0.08	polystyrene60kgm3	0.04	600	60
		4	0.15	concreteBlock	0.7	1100	1200
		5	0.01	plaster	0.58	900	1200
Bale_1991-2000	0.315	1	0.02	render	0.87	1100	1800
		3	0.12	polystyrene15kgm3	0.042	1400	15
		4	0.2	reinforcedConcrete	1.8	1100	2400
		5	0.01	plaster	0.58	900	1200
		Neuchatel_1900-1945	1.643	1	0.02	crepi	0.99
		2	0.4	moellons1800	1	1045	1800
		3	0.01	platre1200	0.43	1000	1200
Neuchatel_1900-1945_IsoInt	0.335	1	0.02	crepi	0.99	850	1800
		2	0.4	moellons1800	1	1045	1800
		3	0.1	isolationPolystyrene15	0.042	1400	15
		4	0.01	platre1200	0.43	1000	1200
Neuchatel_1946-1960	1.463	1	0.02	crepi	0.99	850	1800
		2	0.22	moellons1800	1	1045	1800
		3	0.06	vide d air vertical 6cm	0.333	1400	1.2
		4	0.06	briqueTerreCuitePleine	0.8	900	1800
		5	0.01	platre1200	0.43	1000	1200

Nom du type de mur	Valeur U [W/m <sup>2</sup> .K]	Couche	Épaisseur [m]	Matériau	Conductivité [W/m.K]	C <sub>p</sub> [J/kg.K]	Densité [kg/m <sup>3</sup> ]
Neuchatel_1946-1960_IsoGap	0.518	1	0.02	crepi	0.99	850	1800
		2	0.22	moellons1800	1	1045	1800
		3	0.06	isolationPolystyrene15	0.042	1400	15
		4	0.06	briqueTerreCuitePleine	0.8	900	1800
		5	0.01	platre1200	0.43	1000	1200
Neuchatel_1961-1970	1.139	1	0.02	crepi	0.99	850	1800
		2	0.17	briqueTerreCuitePerforee	0.47	900	1200
		3	0.06	vide d air vertical 6cm	0.333	1400	1.2
		4	0.06	briqueTerreCuitePerforee	0.47	900	1200
		5	0.01	platre1200	0.43	1000	1200
Neuchatel_1961-1970_IsoGap	0.470	1	0.02	crepi	0.99	850	1800
		2	0.17	briqueTerreCuitePerforee	0.47	900	1200
		3	0.06	isolationPolystyrene15	0.042	1400	15
		4	0.06	briqueTerreCuitePerforee	0.47	900	1200
		5	0.01	platre1200	0.43	1000	1200
Neuchatel_1971-1980_IsoAir	0.470	1	0.02	crepi	0.99	850	1800
		2	0.17	briqueTerreCuitePerforee	0.47	900	1200
		3	0.06	isolationPolystyrene15	0.042	1400	15
		4	0.06	briqueTerreCuitePerforee	0.47	900	1200
		5	0.01	platre1200	0.43	1000	1200
Neuchatel_1971-1980_Prefab*	0.568	1	0.08	betonCoule2200	1.6	995	2200
		2	0.06	isolationPolystyrene15	0.042	1400	15
		3	0.17	betonArme	1.8	1100	2400
		4	0.01	platre1200	0.43	1000	1200
Neuchatel_1971-1980_IsoInt	0.570	1	0.02	crepi	0.99	850	1800
		2	0.17	betonArme	1.8	1100	2400
		3	0.06	isolationPolystyrene15	0.042	1400	15
		4	0.02	platre1200	0.43	1000	1200

Nom du type de mur	Valeur U [W/m²·K]	Couche	Épaisseur [m]	Matériau	Conductivité [W/m·K]	C <sub>p</sub> [J/kg·K]	Densité [kg/m³]
Neuchatel_1981-1990_Double	0.232	1	0.02	crepi	0.99	850	1800
		2	0.12	briqueTerreCuiteIsolante	0.11	936	500
		3	0.08	isolationPolystyrene20	0.038	1400	20
		4	0.1	briqueTerreCuiteIsolante	0.11	936	500
		5	0.01	platre1200	0.43	1000	1200
Neuchatel_1981-1990_Prefab	0.410	1	0.08	betonCoule2200	1.6	995	2200
		2	0.08	isolationPolystyrene20	0.038	1400	20
		3	0.17	betonArme	1.8	1100	2400
		4	0.01	platre1200	0.43	1000	1200
Neuchatel_1981-1990_IsoExt*	0.415	1	0.02	crepi	0.99	850	1800
		2	0.08	isolationPolystyrene20	0.038	1400	20
		3	0.17	betonArme	1.8	1100	2400
		4	0.01	platre1200	0.43	1000	1200
Neuchatel_1991-2000_Double	0.172	1	0.02	crepi	0.99	850	1800
		2	0.12	briqueTerreCuiteIsolante	0.11	936	500
		3	0.12	isolationPolystyrene20	0.038	1400	20
		4	0.15	briqueTerreCuiteIsolante	0.11	936	500
		5	0.01	platre1200	0.43	1000	1200
Neuchatel_1991-2000_Prefab	0.286	1	0.08	betonCoule2200	1.6	995	2200
		2	0.12	isolationPolystyrene20	0.038	1400	20
		3	0.17	betonArme	1.8	1100	2400
		4	0.01	platre1200	0.43	1000	1200
Neuchatel_1991-2000_IsoExt*	0.289	1	0.02	crepi	0.99	850	1800
		2	0.12	isolationPolystyrene20	0.038	1400	20
		3	0.17	betonArme	1.8	1100	2400
		4	0.01	platre1200	0.43	1000	1200
Neuchatel_2001-2010_Double	0.141	1	0.02	crepi	0.99	850	1800
		2	0.12	briqueTerreCuiteIsolante	0.11	936	500
		3	0.16	isolationPolystyrene30	0.036	1400	30
		4	0.15	briqueTerreCuiteIsolante	0.11	936	500
		5	0.01	platre1200	0.43	1000	1200

Nom du type de mur	Valeur U [W/m²·K]	Couche	Épaisseur [m]	Matériau	Conductivité [W/m·K]	C <sub>p</sub> [J/kg·K]	Densité [kg/m³]
Neuchatel_2001-2010_Prefab	0.209	1	0.08	betonCoule2200	1.6	995	2200
		2	0.16	isolationPolystyrene30	0.036	1400	30
		3	0.17	betonArme	1.8	1100	2400
		4	0.01	platre1200	0.43	1000	1200
Neuchatel_2001-2010_IsoExt*	0.211	1	0.02	crepi	0.99	850	1800
		2	0.16	isolationPolystyrene30	0.036	1400	30
		3	0.17	betonArme	1.8	1100	2400
		4	0.01	platre1200	0.43	1000	1200
Metamorphoses_ variante_1_Facade	0.087	1	0.002	Fibrociment	0.6	850	1800
		2	0.0225	LameDAir	0.025	850	50
		3	0.32	SwissporLambdaFacade	0.031	1400	18
		4	0.2	BetonArme2p100AcierC3037	2.3	1000	2400
		5	0.01	EnduitMortierInterieur	0.7	900	1500
Metamorphoses_ variante_1_Toiture	0.088	1	0.06	Gravier	0.7	800	1900
		2	0.002	CoucheBitumineuseSIA3811	0.2	1600	1200
		3	0.32	SwissporLambdaRoof	0.029	1400	25
		4	0.2	BetonArme1p100AcierC3037	2.3	1000	2300
		5	0.005	EnduitPlatreCEN	0.7	850	1400
Metamorphoses_ variante_1_Sol	0.133	1	0.015	ParquetChene	0.21	2200	750
		2	0.07	ChappeCiment	1.4	850	2000
		3	0.03	SwissporRoc100KgM3	0.034	830	100
		4	0.2	BetonArme1p100AcierC3037	2.3	1000	2300
		5	0.2	SwissporLambdaLight	0.032	1400	15
Metamorphoses_ variante_1_DalleInt	0.792	1	0.015	ParquetChene	0.21	2200	750
		2	0.07	ChappeCiment	1.4	850	2000
		3	0.03	SwissporRoc100KgM3	0.034	830	100
		4	0.2	BetonArme1p100AcierC3037	2.3	1000	2300
		5	0.005	EnduitPlatreCEN	0.7	850	1400
Metamorphoses_ variante_1_MurInt	3.969	1	0.2	BetonArme2p100AcierC3037	2.3	1000	2400

Nom du type de mur	Valeur U [W/m <sup>2</sup> .K]	Couche	Épaisseur [m]	Matériau	Conductivité [W/m.K]	C <sub>p</sub> [J/kg.K]	Densité [kg/m <sup>3</sup> ]
Metamorphoses_ variante_2_Facade	0.123	1	0.01	EnduitMortierExt	0.87	1100	1800
		2	0.018	PanneauAgglomerBoisExt	0.11	2700	500
		3	0.16	FlumrocType1	0.036	830	32
		4	0.2	FlumrocType1EtPoteauxBois	0.0628	1050	166
		5	0.018	PanneauAgglomerBoisInt	0.11	2700	500
		6	0.01	EnduitMortierInt	0.7	900	1500
Metamorphoses_ variante_2_Toiture	0.081	1	0.06	Gravier	0.7	800	1900
		2	0.002	CoucheBitumineuseSLA3811	0.2	1600	1200
		3	0.3	SwissporLambdaRoof	0.029	1400	25
		4	0.02	PanneauFibreBoisMiDurToit	0.085	2500	650
		5	0.18	DalleBoisConstructionTypique	0.13	1600	500
		6	0.0125	PanneauPlatreCartonne	0.21	800	900
Metamorphoses_ variante_2_Sol	0.133	1	0.015	ParquetChene	0.21	2200	750
		2	0.07	ChappeCiment	1.4	850	2000
		3	0.03	SwissporRoc100KgM3	0.034	830	100
		4	0.2	BetonArme1p100AcierC3037	2.3	1000	2300
		5	0.2	SwissporLambdaLight	0.032	1400	15
Metamorphoses_ variante_2_DalleInt	0.351	1	0.015	ParquetChene	0.21	2200	750
		2	0.07	ChappeCiment	1.4	850	2000
		3	0.03	SwissporRoc100KgM3	0.034	830	100
		4	0.02	PanneauFibreBoisMiDurDalle	0.085	2500	650
		5	0.18	DalleBoisConstructionTypique	0.13	1600	500
		6	0.0125	PanneauPlatreCartonne	0.21	800	900
Metamorphoses_ variante_2_MurInt	3.969	1	0.2	BetonArme2p100AcierC3037	2.3	1000	2400

## A.5 Systèmes énergétiques par défaut

Sur la base des champs gheiz (système de chauffage), genhz (agent énergétique chauffage) et genww (agent énergétique eau chaude) du RegBL, des technologies par défaut sont définies dans les bâtiments pour le chauffage et l'eau chaude, selon les tables suivantes. Un nouveau système énergétique est défini pour l'eau chaude seulement si genww est différent de genhz; dans le cas contraire on considère que le système énergétique pour le chauffage fournit aussi l'eau chaude. Dans les cas non listés ici, aucun système énergétique n'est défini.



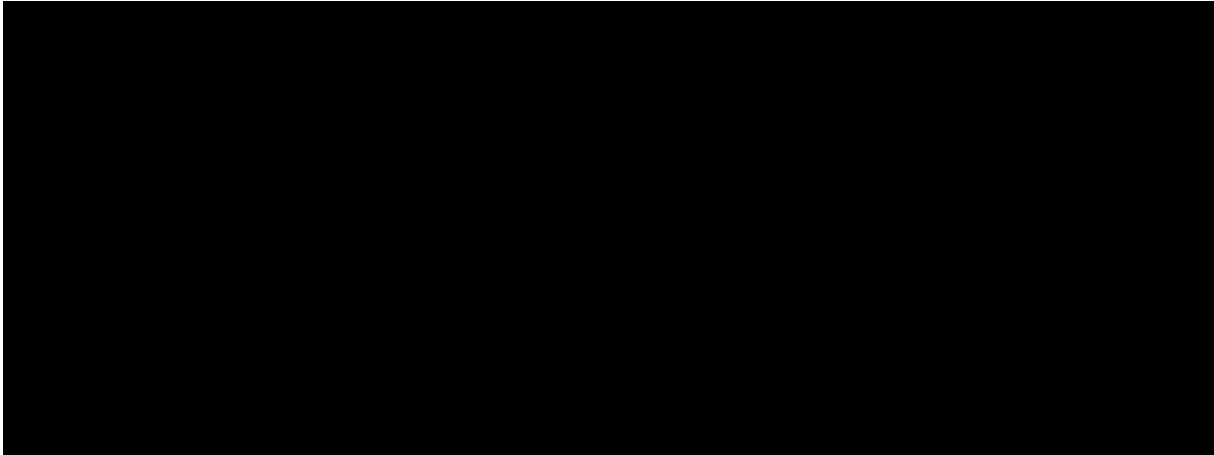
## **A.6 Fraction des services fournis par les systèmes énergétiques**

Dans la mesure où plusieurs systèmes énergétiques sont définis pour satisfaire un service, et si la répartition n'a pas été modifiée auparavant par l'utilisateur, la fourniture du service est automatiquement répartie entre les systèmes énergétiques. Pour les technologies des types listés ci-dessous et dans l'ordre de priorité, on attribue la fraction ci-dessous de la demande restante. Si d'autres systèmes énergétiques sont présents, on répartit de manière uniforme la demande restante entre ces systèmes. On considère enfin que le dernier système énergétique à être traité (i.e. le seul s'il n'y en a qu'un) fournit le reste de la demande, ce qui implique que la partie théoriquement fournie des services est soit de 0 (aucun système énergétique défini), soit de 100%.



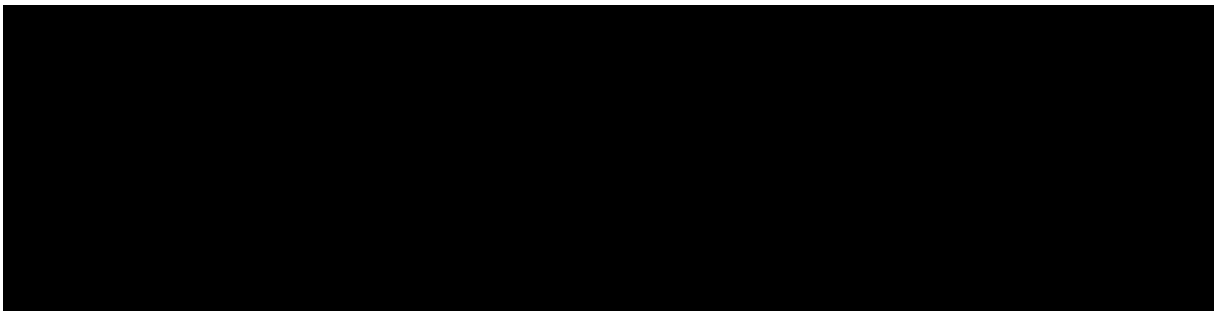
## **A.7 Valeurs par défaut selon la catégorie d'ouvrage**

Les demandes en électricité et en eau chaude sont calculées sur la base de la norme SIA 380/1 (version 2009) ; les autres données SIA du tableau ci-dessous seront aussi utilisées dans le futur pour les simulations par CitySim. Les températures de consignes par défaut ont été définies sur les mêmes catégories.



### **A.8 Types de murs par défaut**

Les types de murs des bâtiments sont attribués par défaut en fonction de la période de construction selon la table suivante :

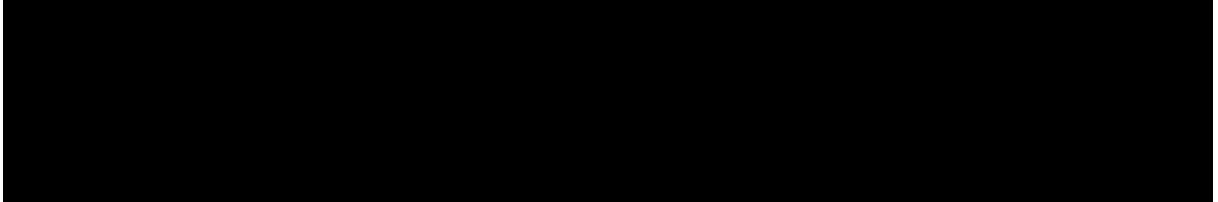




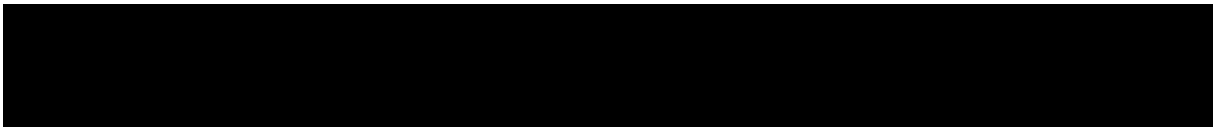
## **B. Modèles de technologie**



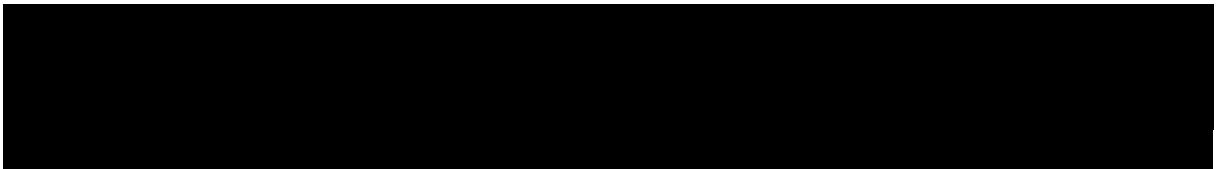
### **B.1 Chaudière**



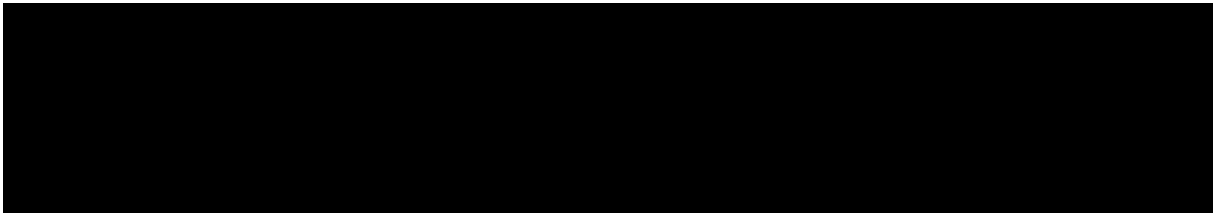
### **B.2 Poêle**



### **B.3 Echangeur de chaleur**



### **B.4 Couplage chaleur-force**



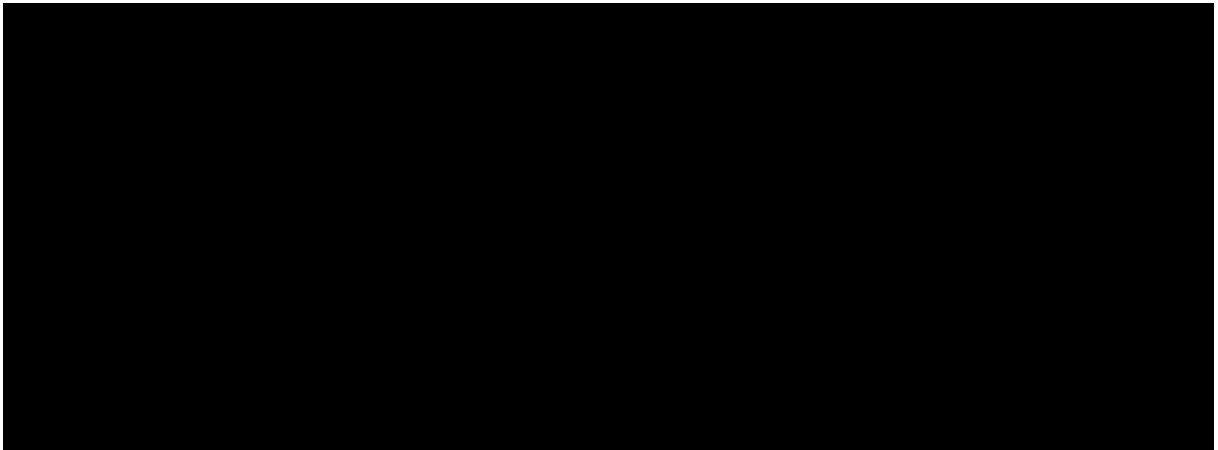
### **B.5 Pompe à chaleur**



### **B.6 Solaire PV**



### **B.7 Solaire thermique**



## C. Modèle d'analyse du cycle de vie

Basé sur les données de KBOB (Conférence de coordination des services de la construction et des immeubles des maîtres d'ouvrage publics de l'Office fédéral des constructions et de la logistique (OFCL), cinq valeurs peuvent être calculées :

"Les données des éco-bilans se fondent sur les flux de matière et d'énergie propres à la branche (EMPA/ecoinvent), ils sont évalués compte tenu de leur influence sur l'environnement. Cette recommandation porte sur l'évaluation globale fondée sur la méthode de la saturation écologique, exprimée en indices de charge polluante (Ecopoints). Cette méthode suisse a été actualisée avec la collaboration des milieux de la recherche, de l'industrie et des offices fédéraux. De ces mêmes flux de matière et d'énergie sont tirées en plus des évaluations partielles : l'énergie primaire (valeur totale et part d'énergie renouvelable) ainsi que les émissions de gaz à effet de serre qui sont la base des instruments de planification de la SIA." (Citation de KBOB, page 1)

### Indicateurs : (Citations selon page 6 de KBOB)

**Ecopoints** : "Les Ecopoints (UBP) quantifient les charges environnementales résultant de l'utilisation des ressources énergétiques, de la terre et de l'eau douce, des émissions dans l'air, l'eau et le sol, ainsi que de l'élimination des déchets."

**Energie primaire** : "Le total de l'énergie primaire indique l'énergie cumulée des sources d'énergie non renouvelables et renouvelables. Les sources d'énergie renouvelables comprennent la force hydraulique, le bois, la biomasse (sans déboisement de forêts primaires), l'énergie solaire, éolienne, géothermique et environnementale."

**Energie primaire non-renouvelable** : "L'énergie non-renouvelable indique l'énergie cumulée de la consommation énergétique fossile et nucléaire ainsi que le bois issu du déboisement de forêts primaires. Les différences dans l'appréciation des vecteurs énergétiques provoquent des écarts dans les données, déterminées selon la série de publication Environnement 307 de l'OFEV (appréciation écologique à l'aide de l'énergie grise). "

**Emissions de gaz à effet de serre** : "L'effet de serre évalue les effets cumulés de différents gaz à effet de serre par rapport à la substance principale qu'est le CO<sub>2</sub>."

**Energie primaire renouvelable (valeur dérivée)** : Cette valeur représente la différence entre l'énergie primaire globale et l'énergie primaire non renouvelable.

