



**HAL**  
open science

## Les enjeux de la conception en phase d'esquisse pour les systèmes du génie électrique : illustration sur le cas des systèmes énergétiques pour les bâtiments

Frédéric Wurtz, Benoît Delinchant, Xavier Brunotte, Julien Pouget, van Binh Dinh

### ► To cite this version:

Frédéric Wurtz, Benoît Delinchant, Xavier Brunotte, Julien Pouget, van Binh Dinh. Les enjeux de la conception en phase d'esquisse pour les systèmes du génie électrique : illustration sur le cas des systèmes énergétiques pour les bâtiments. SGE 2014 - Symposium de Génie Electrique 2014, Jul 2014, Cachan, France. 7 p. hal-01024644

**HAL Id: hal-01024644**

**<https://hal.science/hal-01024644v1>**

Submitted on 17 Jul 2014

**HAL** is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

L'archive ouverte pluridisciplinaire **HAL**, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.

# Les enjeux de la conception en phase d'esquisse pour les systèmes du génie électrique : illustration sur le cas des systèmes énergétiques pour les bâtiments

F. Wurtz<sup>1</sup>, B. Delinchant<sup>1</sup>, Xavier Brunotte<sup>2</sup>, Julien Pouget<sup>3</sup>, Dinh Van Binh<sup>1</sup>

<sup>1</sup>G2elab : Laboratoire de génie électrique de Grenoble, ENSE3 : 961, Rue de la Houille Blanche, BP 46, 38402 Saint Martin d'Hères

<sup>2</sup> VESTA-SYSTEM: 22, avenue Doyen Louis Weil, 38000 Grenoble

<sup>3</sup> SNCF : Innovation & Recherche, 40, avenue des Terroirs de France, 75611 Paris Cedex 12

**RESUME** - Ce papier propose de donner un statut, et un outil, aux phases de conception initiale, dans lesquelles les caractéristiques principales du système énergétique utilisant l'énergie électrique doivent être esquissées. Nous proposons ainsi, d'utiliser un type de modèle adapté (modèle macroscopique et statique basé sur des bilans énergétiques et financiers). Ces modèles sont réalisés à l'échelle des composants du système et ils comportent des équations et des contraintes, qui sont ensuite composées à l'échelle du système, via des ports énergétiques et financiers. Il en résulte un modèle qui peut dès lors, être utilisé par des techniques d'optimisation. Cela permet de fournir un dimensionnement global et simultané des caractéristiques du système (taille et dimension des systèmes énergétiques) tout en esquissant une stratégie de gestion optimale sur des cycles de fonctionnement type. La fonction objectif est un coût global du système intégrant les coûts d'investissement, de maintenance et d'exploitation. Cette approche est illustrée sur un exemple de gare, représentatif à la fois des enjeux de la filière bâtiment, mais aussi représentatif de cette problématique de conception générique des systèmes hybrides comportant des sources, des charges et des moyens de stockage, auquel le génie électrique est de plus en plus confronté via des applications dans les transports terrestres, aéronautiques, le smart-building, le smart-grid, ...

*Mots-clés— conception, dimensionnement optimisation, esquisse énergétique, approche système, stockage, système hybrides, conception intégrée taille des systèmes & stratégie de supervision*

## 1. INTRODUCTION DE LA NOTION D'ESQUISSE ENERGETIQUE POUR LE BATIMENT : DEFINITION CONCEPTUELLE ET PROPOSITION D'UN TYPE D'OUTIL AD'HOC

On se propose d'introduire un concept innovant d'esquisse énergétique. Il s'agit d'un concept équivalent à ce qui peut exister en architecture ou en design [HAU-01], mais focalisé sur l'aspect énergétique. On propose, pour instrumenter cette phase, de définir un concept d'outil d'esquisse énergétique utilisant:

- des approches d'optimisation comme aide à la décision

- des modèles d'esquisse énergétique, qui doivent être d'une nature (hypothèses et niveaux de modélisations) et qui doivent porter des informations (comme des contraintes) compatibles avec l'objectif d'esquisse.

On illustrera ainsi comment ce type d'outil et d'approche permet d'« esquisser » simultanément les caractéristiques principales du système énergétique et la stratégie optimale de gestion énergétique. Ce concept et ce type d'outil ont été imaginés et appliqués ici pour des gares à énergie positive, mais les concepts et outils proposés s'avèrent être génériques et utilisables pour système ayant vocation à utiliser de l'énergie électrique.

## 2. L'ESQUISSE ENERGETIQUE : UN CONCEPT GENERIQUE MIS EN RELIEF DANS LE CONTEXTE DE LA CONCEPTION DES SYSTEMES BATIMENTS

Si le concept d'esquisse énergétique est général aux systèmes hybrides que l'on peut rencontrer en génie électrique, nous nous proposons néanmoins d'en montrer l'importance dans ce papier en s'appuyant sur les enjeux et la conception des systèmes bâtiments.

Ce n'est sans doute pas un hasard non plus, si cette notion d'esquisse énergétique a été formalisée dans notre groupe de recherche dans la thématique bâtiment, tant il est vrai que dans cette filière, la notion d'esquisse est valorisée, en faisant en particulier la noblesse du métier d'architecte. Or nous comptons montrer que cette mise en valeur doit dépasser la simple filière bâtiment et concerner tous les domaines de la conception en général, et celle des systèmes énergétiques en particulier.

## 3. IMPORTANCE, PLACE ET ROLE DE LA PHASE D'ESQUISSE DANS LE PROCESSUS DE CONCEPTION

Les phases d'esquisses sont les phases du processus de conception qui font partie des phases préliminaires. Les études théoriques sur l'activité de conception [VIS-04] montrent que, si ces phases préliminaires ne représentent qu'un faible coût

(5% du coût des projets), elles sont pour autant fondamentales, car on y prend les décisions qui figent 75% des coûts totaux du projet. Il est donc important d'y d'explorer le maximum de possibilités, avec des outils de modélisation et d'aide à la décision pertinents, afin de fixer les bons choix dès les phases initiales, et en intégrant au plus tôt des aspects habituellement décidés très tard dans le cycle de conception des produits, comme la stratégie de gestion optimale.

### Importance phase esquisse

- L'importance fondamentale des phases de pré-dimensionnement et d'études de faisabilité dans le processus de conception
- 5% du coût mais 75% des impacts

### Place phase esquisse

- Phase d'avant projet
- Réponse aux appels d'offre
- Formulation des besoins
- Aide au choix des structures

Fig. 1 : Importance, place de l'esquisse dans les processus de conception

#### 3.1.1. Illustration de cette importance dans la filière bâtiment

L'exemple de la filière bâtiment est particulièrement percutant pour comprendre les enjeux et la complexité relatifs à cette phase d'esquisse, dès lors qu'on rappelle :

- qu'un bâtiment est un investissement lourd
- réalisé pour du long terme (un bâtiment doit durer plus de 30 ans)
- que dès les phases d'esquisses, il conviendrait :
  - o de ne pas se tromper dans la multiplicité des choix de conception possibles sur par exemple les choix de systèmes de production énergétique (PV, co-générateurs, chaudière gaz, chaudière bois, ...)
  - o d'avoir une vue globale du coût de type Analyse de cycle de vie incluant l'investissement initial, les coûts d'exploitation et de maintenance, et si possible de démantèlement
  - o en gérant toutes les incertitudes liées à l'évolution des coûts des technologies et de l'énergie
- ce d'autant plus que la filière bâtiment représente 42% de l'énergie primaire consommée en France et 64% de la consommation d'électricité [PEU].

Il convient donc d'être efficace au plus tôt et dès les phases d'esquisse vu le poids économique, énergétique et environnemental de cette filière

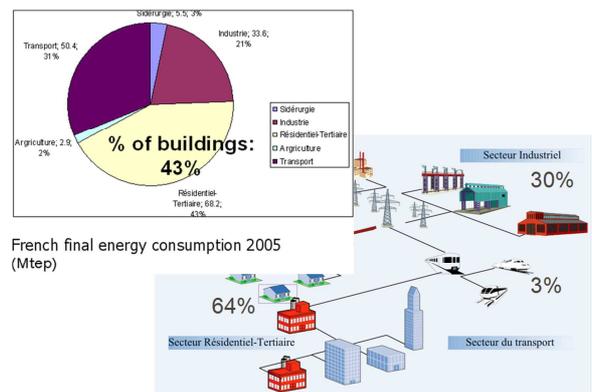


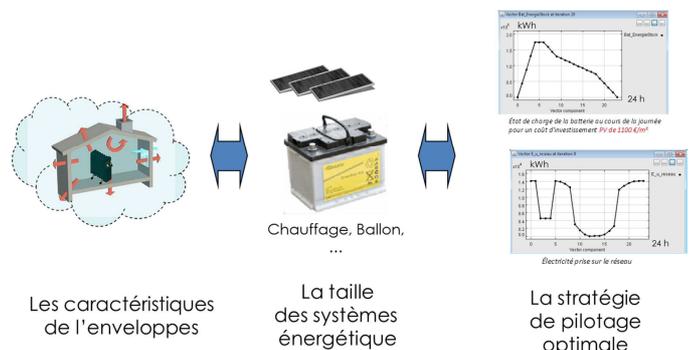
Fig. 2 : Le poids énergétique du bâtiment [PEU]

#### 4. LES DIFFICULTES ET VEROUS LIES A LA PHASE D'ESQUISSE

On insistera aussi sur la difficulté de la phase d'esquisse expliquant sans doute pourquoi cette phase est certainement pour le moment peu, ou pas instrumentée avec des outils et des concepts efficaces. Ceci est certainement dû à des difficultés fondamentales inhérentes à cette phase : le système n'est pas encore descriptible et connu dans ses détails, il est juste esquissé, il faut néanmoins s'appuyer et définir des outils et des modèles de calcul.

Par ailleurs, la montée en efficacité dans cette phase du processus de conception nécessite de franchir les verrous, d'une prise en compte dès les phases initiales du processus de conception :

- d'un maximum de paramètres et de contraintes,
- d'un maximum de composants,
- avec une vue « système et couplée » qui s'illustre à titre d'exemple dans la filière bâtiment par la volonté de concevoir au plus tôt simultanément l'enveloppe + les systèmes énergétiques + la stratégie de pilotage.



**Le faire simultanément car tout est couplé !**

Fig. 3 : Verrou de la phase esquisse : concevoir au plus tôt avec une vue « système et couplée »

#### 5. INTRODUCTION D'UN TYPE «MODELE D'ESQUISSE ENERGETIQUE» POUR LES COMPOSANTS DU SYSTEME

Pour cette phase d'esquisse énergétique, nous proposons d'introduire pour chaque composant du système, un type de

modèle dédié à l'optimisation énergétique qui comporte une dimension physique, avec pour chaque composant des équations reliant les principales dimensions physiques aux performances énergétiques et flux énergétiques (pour l'énergie électrique, l'énergie thermique, ...). Ceci est réalisé par des modèles analytiques et statiques. Il n'est pas utile et pertinent, dans cette phase d'esquisse, de lancer des outils de simulation fine car : le système et les composants ne sont pas encore connus finement, il existe un besoin d'estimation rapide pour explorer le maximum de combinaisons et de possibilités. Il s'agit aussi d'introduire une dimension économique en estimant le coût économique sur la durée de vie prévue pour le composant qui sera la somme des coûts d'investissement et des coûts d'exploitation (ce qui est une manière d'esquisser un calcul d'Analyse de Cycle de Vie, même si le démantèlement n'est pas intégré, et doit plutôt faire l'objet d'ACV ultérieures [DEB97] sans doute dans une phase plus avancée du processus de conception).

Dans ce but, chaque composant possible du système doit fournir des équations pour calculer : les coûts d'investissement, les coûts d'exploitation et des contraintes qui peuvent porter sur : la taille des équipements (cf. la taille du panneaux solaire qui doit rester inférieure à une surface max qui est typiquement la surface du toit), le fonctionnement des équipements (cf. l'état de charge de la batterie qui doit rester inférieur à la capacité max de la batterie), des ports qui doivent permettre la composition à l'échelle du système au niveau des flux énergétiques et économiques.

### 5.1.1. Exemple d'un modèle de batterie dédié à l'esquisse énergétique

La figure 4 illustre la structure d'un tel modèle pour l'exemple d'une batterie électrique. Nous allons détailler les équations et contraintes définies, avec les hypothèses associées, de sorte à avoir un modèle permettant le dimensionnement de cette batterie en phase d'esquisse, et la détermination de la stratégie optimale de gestion de cette batterie sur 1 journée de 24h discrétisée par pas de 1H (ce qu'on appellera par la suite un cycle).

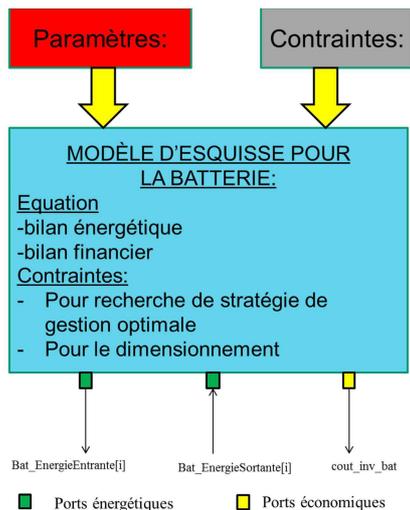


Fig. 4 : Structure des modèles de composants réalisés pour un outil d'esquisse énergétique

### Équations du modèle d'esquisse de la batterie

*Calcul de l'état de charge de la batterie - bilan énergétique du composant batterie – connexion au port énergétique du système*

On détermine à chaque heure l'état de charge de la batterie (en W) en fonction de l'état de charge à l'heure précédente et du bilan de puissance entrée-sortie de la batterie modulé par son rendement. Il s'agit typiquement d'une équation de bilan d'énergie typique de celle que l'on peut trouver dans les modèles d'esquisses que nous avons développés :

$$[eqbat1] : \text{Pour } i \in [0;23] : \\ \text{Bat\_EnergieStockee}[i+1] = \text{Bat\_EnergieStockee}[i] \\ + \text{Bat\_EnergieEntrante}[i] * \text{Rendement\_convertisseur} \\ - \text{Bat\_EnergieSortante}[i] / \text{Rendement\_convertisseur}$$

C'est par cette équation que la batterie est énergétiquement reliée au système électrique, à chaque pas horaire du cycle, par les ports Bat\_EnergieEntrante[i] et Bat\_EnergieSortante[i]

*Calcul du bilan et du coût financier de la batterie - connexion aux ports économiques du système*

On va supposer que le coût de la batterie (investissement+maintenance) dépend proportionnellement de la puissance qui en est extrait sur le nombre de cycle que l'on va considérer : c'est un exemple typiquement de modèle ad'hoc en phase d'esquisse, offrant un juste compromis qui ne soit ni trop fin, ni trop grossier. On fait donc la somme heure par heure des puissances sortantes. On multiplie ensuite par le nombre de jour de l'étude (le nombre de cycle) et par le coefficient de proportionnalité permettant d'aboutir au prix final.

$$[eqbat2] : \text{Pour } i \in [0;23] : \text{Interne\_Qe} = \text{NbCycle} * \Sigma \\ \text{Bat\_EnergieSortante}[i]$$

$$[eqbat3] : \text{cout\_inv\_bat} = \text{Interne\_Qe} * c\_inv\_bat$$

On introduit ainsi la dimensionnement économique et financière. Chaque composant du système doit ainsi renvoyer des informations relatifs à son coût d'investissement et à son coût d'exploitation, constituant les ports économiques que ces composants doivent offrir pour pouvoir calculer un coût d'investissement et d'exploitation global à l'échelle du système. Ici le port économique est couv\_inv\_bat intégrant le coût d'investissement et d'exploitation pour la batterie.

### Contraintes du modèle d'esquisse de la batterie

Le modèle est destiné à être utilisé avec un algorithme d'optimisation, qui aura pour objectif de chercher simultanément un dimensionnement de la batterie et une stratégie de gestion optimale sur cycle de fonctionnement (stratégie de pilotage). Il est en résulte que le modèle doit comporter, en plus des équations précédentes de bilan énergétique et financier, des contraintes liées à la recherche de la stratégie de pilotage optimale et au dimensionnement optimal.

*Contraintes liées à la recherche de la stratégie de gestion optimale*

*Contrainte à annuler pour trouver l'état de charge initial optimal de la batterie*

On définit en fait ici un ensemble d'une équation et d'une contrainte permettant de faire le lien entre les états de charge de la batterie aux heures 0 et 23 :

[eqbat4] :

$$\begin{aligned} & Bat\_EnergieStockee\_Annuler = Bat\_EnergieStockee[0] \\ & - Bat\_EnergieStockee[23] \\ & + Bat\_EnergieEntrante[23] * Rendement\_convertisseur \\ & - Bat\_EnergieSortante[23] / Rendement\_convertisseur \end{aligned}$$

On associera donc à cette équation la contrainte :

$$[cbat1] : Bat\_EnergieStockee\_Annuler = 0$$

Cet ensemble équation+contrainte impose ainsi à l'optimiseur de trouver une stratégie de pilotage de la batterie sur un jour de fonctionnement avec une condition de cyclicité, permettant typiquement de reproduire le cycle de fonctionnement sur un grand nombre de jours. On pourra ainsi supposer qu'il peut y avoir dans l'année N cycles de fonctionnement identiques, avec typiquement N=4 pour un cycle printemps + cycle été + cycle automne + cycle hiver. Ces cycles seront reproduits le nombre de fois nécessaires pour couvrir une année typique.

*Contraintes limitant la puissance extraite/injectée dans la batterie*

Ces contraintes font partie des contraintes de fonctionnement classiques d'une batterie :

$$[cbat2] : \text{Pour } i \in \{0;23\} :$$

$$0 < Bat\_EnergieEntrante[i] < 2000 \text{ kW}$$

$$[cbat3] : \text{Pour } i \in \{0;23\} :$$

$$0 < Bat\_EnergieSortante[i] < 2000 \text{ kW}$$

Cette puissance est ici à titre d'exemple limitée à 2000 kW, mais au lieu d'avoir une valeur fixe, on peut définir un paramètre qui peut être introduit dans la liste des paramètres du tableau 1.

*Contraintes liant le dimensionnement de la batterie et le cycle de fonctionnement optimal*

*Contraintes imposant que l'état de charge de la batterie soit inférieur à sa capacité*

Il s'agit de la contrainte suivante :

$$[cbat4] : 0 < Bat\_EnergieStockee[i] < Bat\_Capacite$$

La prise en compte de cette contrainte par l'algorithme d'optimisation va permettre de lier la recherche de taille optimale de la batterie (Bat\_Capacite) à la recherche du cycle optimale de gestion de celle-ci (définie par Bat\_EnergieStockee[i], elle-même lié à Bat\_EnergieEntrante[i] et Bat\_EnergieSortante[i] via [eqbat1]).

Le tableau 1 donne les paramètres définis pour le modèle de batteries (ce sont des variables constantes au cours d'une optimisation, mais qui peuvent varier d'une optimisation à

l'autre), tandis que le tableau 2 donne la liste des variables d'optimisation.

Description des paramètres	Nom du paramètre	Unité
Rendement du convertisseur	Rendement_convertisseur	[-]
Coût de la batterie	c_inv_bat	[€/Wh]
Contrainte à annuler pour assurer gestion cyclique de la batterie	Bat_EnergieStockee_Annuler	[-]
Nombre de cycles	NbCycles	[-]

Tableau 1: Paramètres du modèle de batterie

Description des variables	Nom de la variable	Unité
État de charge de la batterie	Bat_EnergieStockee[i]	[Wh]
Energie entrante dans la batterie	Bat_EnergieEntrante[i]	[Wh]
Energie entrante dans la batterie	Bat_EnergieSortante[i]	[Wh]
Capacité de la batterie	Bat_capacite	[Wh]
Quantité d'énergie qui sort de la batterie sur le nombre de cycles	Qe	[Wh]
Coût d'investissement de la batterie pour une année	cout_inv_bat	[€]

Tableau 2: Variables d'optimisation du modèle de batterie.

## 6. COMPOSITION DES « MODELE D'ESQUISSE ENERGETIQUE » : GENERATION DES EQUATIONS ET DES CONTRAINTES DE DIMENSIONNEMENT ET DE FONCTIONNEMENT A L'ECHELLE DU SYSTEME

Ces modèles sont ensuite composés pour le modèle d'esquisse de l'ensemble comme cela est illustré sur la figure 4 : les modèles sont composés via les ports énergétiques et économiques. Cette composition permet à l'échelle du système global, non seulement la composition des équations, mais aussi des contraintes.

## 7. EMPLOI DE TECHNIQUES D'OPTIMISATION

Ici l'optimisation ne doit pas être considérée comme un outil qui doit permettre de trouver LA solution optimale, mais plutôt comme un outil d'aide à la décision, assisté par l'optimisation, afin que le concepteur soit essentiellement et principalement à même de se construire une conviction en répondant typiquement à des questions telles :

Quelle est la bonne topologie du système ?,

Est-ce que le problème est bien posé ? Est-ce-que les équations et les contraintes sont correctes cohérentes et plausibles ?,

ceci en ayant la possibilité de mener des études d'alternatives et de scénarios en testant des hypothèses sur l'évolution des coûts d'énergie, des coûts des technologies, ...

Dans notre cas, les algorithmes d'optimisation déterministes (type gradient type SQP [POW-85], ou MILP [HA-10]) sont privilégiés pour leur rapidité de convergence (il est primordial d'itérer rapidement) et leur capacité à gérer un grand nombre de paramètres et de contraintes dont on montrera que c'est une caractéristiques des modèles d'esquisses tels que nous les établissons ici.

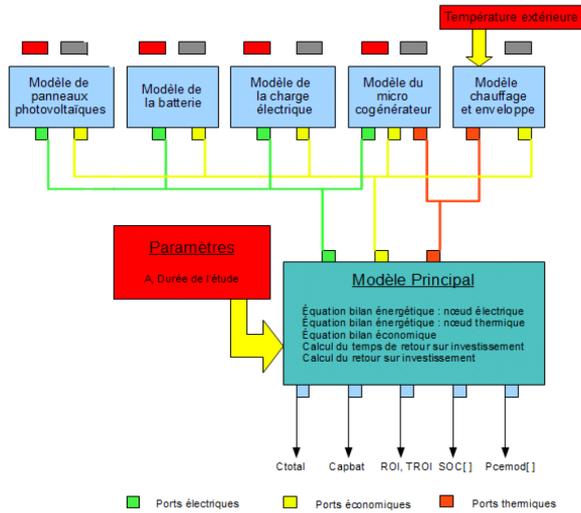


Figure 5 : Composition des modèles (équations + contraintes) à l'échelle du système via les ports (énergétiques et financiers)

### 8. L'EXEMPLE CONSIDERE: DIMENSIONNEMENT SIMULTANE DE L'ENVELOPPE + LA TAILLE DES SYSTEMES ENERGETIQUES +LA STRATEGIE DE SUPERVISION OPTIMALE

L'exemple qui sera présente a été construit pour un bâtiment type gare pouvant être équipé de systèmes énergétiques tels que des panneaux solaires, des co-générateurs, des batteries, ... Il possède un réseau thermique de chauffage et il est connecté au réseau électrique avec une courbe de charge électrique pouvant comporter des capacités de report.

Le modèle et l'application ont été développés dans le framework CADES initialement développé au G2ELAB [DEL-07] et industrialisé à présent par Vesta-system (cf. <http://www.cades-solutions.com>).

Ceci a permis de réaliser l'outil d'optimisation en phase d'esquisse qui est visualisé sur la figure 6 selon le processus détaillé sur la figure 7°:

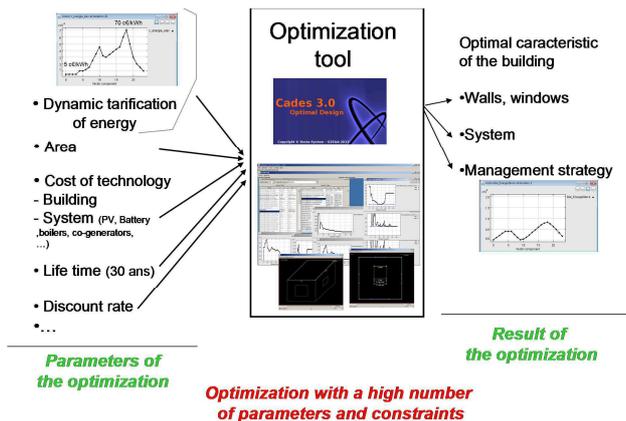


Fig. 6 : Outil pour la phase d'esquisse énergétique réalisant permettant le dimensionnement simultané du bâtiment, de la taille des systèmes énergétiques et de la stratégie de supervision

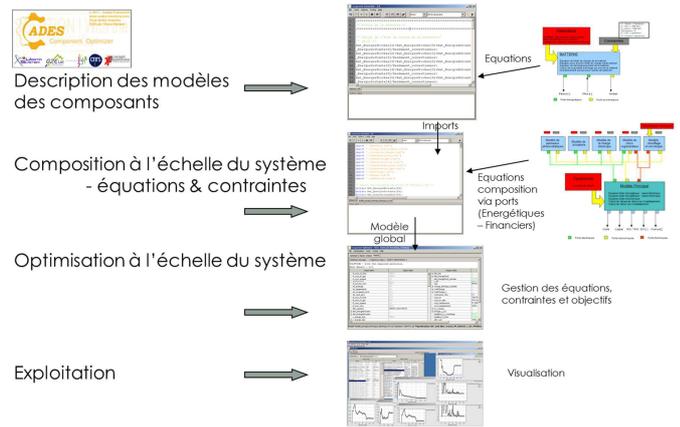


Fig. 7 : Processus de construction et d'utilisation de l'outil d'optimisation dans la phase d'esquisse

### 9. L'OPTIMISATION SYSTEME EN PHASE D'ESQUISSE : DES OPTIMISATIONS DE GRANDE TAILLE AVEC UN GRAND NOMBRE DE PARAMETRES ET DE CONTRAINTES

L'une des caractéristiques des problèmes d'esquisses ainsi formulés, est qu'ils se caractérisent très vite par un grand nombre de variables et de contraintes.

Ceci résulte du fait de vouloir réaliser, au plus tôt dans le processus de conception les objectifs suivants :

- Optimiser simultanément tous les composants du système : ici l'enveloppe thermique, la taille des PV, des co-générateurs, des batteries, des systèmes de chauffages qui peuvent combiner du fuel, du gaz, ... Soit  $NbComp$  ce nombre de composants.
- En optimisant y compris la stratégie de pilotage optimale, ce qui signifie discrétiser chaque cycle de fonctionnement pour chaque composant. Soit  $NbCycle$  le nombre de cycles considérés et  $NbvarCycle$  le nombre de variables considéré sur chaque cycle de fonctionnement.

Si typiquement  $NbComp=10$ ,  $NbCycle=4$ ,  $Nbvarcycle=25$ , on arrive aisément à un nombre de variables d'optimisation de :  $10*4*25=1000$ , sachant que chaque variable peut-être soumise à plusieurs contraintes, et donc il faudra gérer simultanément plusieurs milliers de contraintes.

A titre d'exemple, dans le problème de gare qui fait l'objet de ce papier, le modèle d'optimisation du système peut compter jusqu'à 366 variables d'entrées et 190 variables de sorties qui peuvent chacune se voir poser des contraintes d'égalités ou d'inégalités.

Cette taille de problème implique d'utiliser des algorithmes déterminés de type MILP ou SQP qui sont aptes à gérer un si grand nombre de contraintes et de paramètres en un temps de réponse rapide (le temps étant un paramètre important en phase d'esquisse ou le concepteur se doit de multiplier les essais et les esquisses). Une hybridation avec des algorithmes stochastiques peut toutefois être considérée, en cas de présence de problèmes de convergence dépendant du point du départ (pour des algorithmes de types SQP), ou en cas de problèmes

comportant des optima locaux, mais la convergence finale ne peut être assurée que par un algorithme déterministe assurant dans tous les cas une gestion fine des contraintes malgré leur grand nombre.

### 10. DESCRIPTION D'ETUDES ET DE RESULTATS QUE L'ON PEUT PRODUIRE L'OUTIL D'ESQUISSE ENERGETIQUE PROPOSE

On montre ici des études et des analyses qui peuvent typiquement réalisées avec le type d'outil d'esquisse que nous proposons. L'objectif ici n'est pas de nous focaliser sur les valeurs quantitatives, que nous ne présenterons pas en détails, ce qui nous emmènerait dans des discussions sur les scénarios et les hypothèses prises en compte, ce qui n'est pas l'objet de ce papier. Notre prétention est ici simplement de montrer le type de résultat et d'étude qu'un concepteur peut mener en phase d'esquisser de sorte à pouvoir prendre des décisions au plus tôt, qui soient le mieux éclairées possible et avec une vision qui soit la plus système et la plus intégrée possible.

Sur toutes les optimisations réalisées, la fonction objectif était un coût global du bâtiment intégrant le coût d'investissement, d'exploitation et de maintenance sur une durée de vie de 30 ans.

Avec l'approche d'esquisse proposée nous sommes aptes à produire rapidement des résultats comme ceux visualisés sur la figure 7, issus d'une série d'optimisations paramétrées montrant la surface optimale de PV dans laquelle investir en fonction de la technologie PV que l'on fait varier entre 200 et 1100 €/m<sup>2</sup> avec 20 optimisations réalisées entre ces 2 extrêmes. On notera tout d'abord qu'avec l'approche d'optimisation utilisée (SQP + Calcul de gradient du modèle), l'optimisation est rapide : de l'ordre de 1 minutes pour les 20 optimisations, en assurant une convergence fine (respect précis des contraintes).

Ce type d'optimisation paramétré est très intéressant pour gérer l'incertitude, typiquement ici l'incertitude sur le prix de la technologie PV : sachant que le concepteur a cette incertitude à gérer, et qu'il devra prendre des risques en conséquences, une bonne manière d'éclairer sa décision, est d'étudier tous les scénarios de prix possibles, pour ensuite prendre sa décision en fonction des résultats de chacun de ces scénarios.

Ainsi ces optimisation paramétrés font apparaître des effets de seuils : pour un coût PV entre 200€/m<sup>2</sup> et 450 €/m<sup>2</sup>, l'optimisation nous indique que la surface optimale de PV est de 178 m<sup>2</sup>. Dans ces hypothèses de prix (les autres hypothèses étant constantes par ailleurs), l'optimisation d'esquisse nous indique donc que nous avons intérêt à maximiser la production de production de photovoltaïque en quantifiant l'ordre de grandeur de PV à installer.

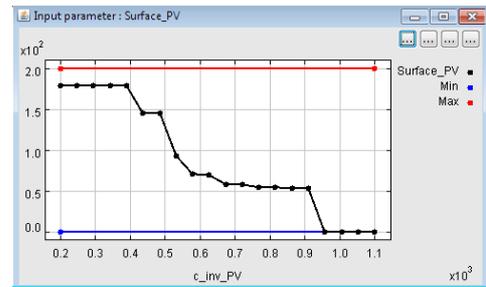


Fig. 8: Taille optimale de panneaux solaires (en m<sup>2</sup>) en fonction du coût de la technologie de panneaux solaires (en k€/m<sup>2</sup>) – Chaque point correspond à une optimisation réalisée en faisant varier  $c_{inv\_PV}$  entre 200 €/m<sup>2</sup> et 1100 €/m<sup>2</sup>

$$200 \text{ €/m}^2 \leq c_{inv\_PV} \leq 450 \text{ €/m}^2$$

Intérêt de maximiser la production photovoltaïque

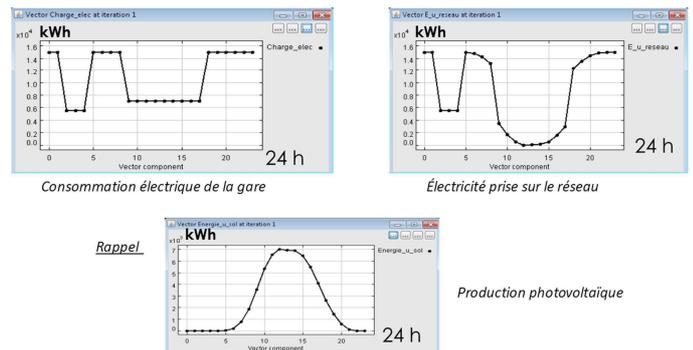


Fig. 9: Focus sur une optimisation dans la zone 200€/m<sup>2</sup> à 450 €/m<sup>2</sup> : la « Consommation électrique de la gare » et la « production photovoltaïque » sont des paramètres d'entrée, mais « l'électricité prise sur le réseau » est un résultat d'optimisation

La figure 9 fait un focus sur 1 optimisation typique obtenue dans la zone comprise entre 200€/m<sup>2</sup> et 450 €/m<sup>2</sup>. On voit que la production d'énergie photovoltaïque est maximisée pour notamment annuler l'Electricité prise sur le réseau (typiquement vers 12H).

La figure 10 fait un focus sur une optimisation typique que l'on peut obtenir dans la zone 450€/m<sup>2</sup> <  $c_{inv\_PV}$  < 950 €/m<sup>2</sup> : le coût de la technologie PV augmentant, l'optimiseur nous montre l'intérêt d'introduire un co-générateur qui devient dès lors une technologie compétitive. Il en résulte qu'une partie de la production d'électricité, prise précédemment sur le réseau est assurée à présent par le co-générateur, ce qui se traduit par le fait que l'énergie prise sur le réseau devient d'autant plus faible

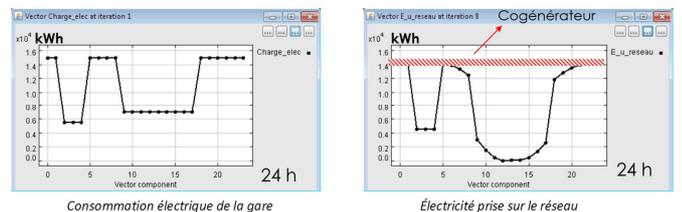


Fig. 10: Focus sur une optimisation typique dans la zone 450€/m<sup>2</sup> à 950 €/m<sup>2</sup> - La technologie co-générateur devient à présent compétitive et permet de diminuer l'énergie prélevée sur le réseau (cf. partie hachurée consommée en moins)

La figure 11 montre la stratégie de gestion optimale de la batterie trouvée pour  $c_{inv\_PV}=200$  €/m<sup>2</sup> et  $c_{inv\_PV}=450$  €/m<sup>2</sup>. On y observera que :

- La stratégie de gestion de la batterie est toujours déterminée pour plutôt charger de l'électricité du réseau lorsque celle-ci est peu chère, et la décharger localement lorsque le prix de cette électricité du réseau monte
- Que la taille optimale de la batterie préconisée est beaucoup plus grande lorsque le coût PV est grand

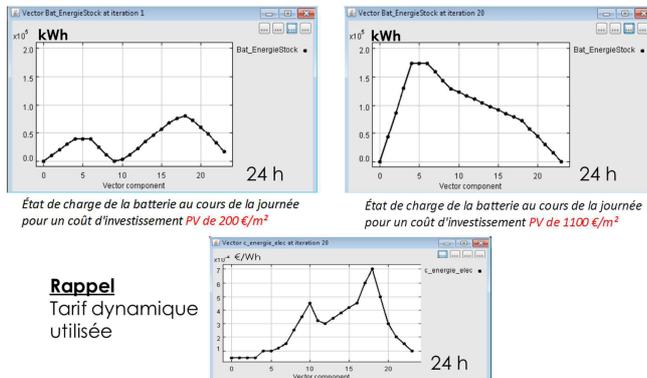


Fig. 11: Exemples de stratégie de gestion de batterie (sur 1 journée type de fonctionnement) pour des prix extrêmes de la technologie PV – Les stratégies de gestion de la batterie sont des résultats d'optimisation, le vecteur de « Tarif dynamique utilisé » est un paramètre de l'optimisation

La figure 12 donne un exemple d'évolution de la résistance thermique optimale du bâtiment côté est : on constate qu'elle diminue avec des effets de seuils qui semblent a priori peu compréhensibles. En fait il s'agit d'un effet système résultant du mécanisme suivant : dès lors que la technologie PV devient plus chère, la technologie du co-générateur devient plus intéressante, et à chaque que l'on introduit un co-générateur de taille plus grande, on bénéficie en même temps d'une production de chaleur. Cette production de chaleur permet d'assurer ensuite le même confort thermique en permettant un bâtiment moins isolé thermiquement, ce qui s'avère être l'optimum dans le cadre du modèle et des hypothèses formulées.

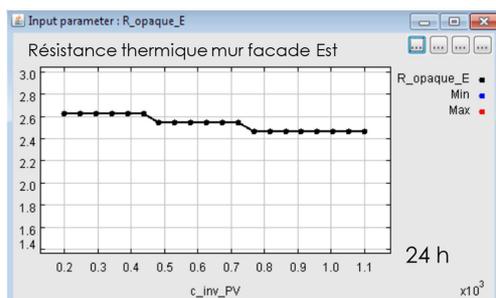


Fig. 12: Evolution de la résistance thermique des murs

Les résultats des scénarios précédents n'ont pas vocation à être généralisés : ils ne peuvent l'être, car ils ont été établis dans le cadre de modèles d'esquisse et d'un nombre important d'hypothèses et de choix de paramètres que nous ne pouvons exposer ici. Leur seule ambition et de montrer le potentiel de l'approche en terme de capacité à construire rapidement des

scénarios, des analyses. Ces derniers doivent permettre aux concepteurs et aux décideurs d'avoir une quantification rapide des scénarios qu'ils esquissent en gérant simultanément un grand nombre de composants, qu'ils dimensionnent simultanément tout en optimisant les cycles de fonctionnement le tout intégré dans un coût global sur la vie du système. Ces scénarios doivent leur permettre de construire une vision, et une conviction sur les bons choix à faire au plus tôt dans le processus de conception. Cette vision doit ensuite s'affiner par des étapes du processus de conception de plus en plus fine et détaillée devant mener à la réalisation finale.

## 11. CONCLUSION

Cet article présente un concept d'outil innovant d'esquisse énergétique, dont nous avons validé le principe sur une application de gare à énergie positive. Cet outil permet non seulement de dimensionner les caractéristiques de l'enveloppe du bâtiment, des systèmes, tout en calculant une stratégie de gestion optimale. Ce type d'approche est pertinent et son développement est fondamental pour améliorer les processus de conception des systèmes énergétiques utilisant l'énergie électrique. Ce concept a vocation à être utilisé pour d'autres systèmes énergétiques hybride multi-sources et multi charges, comme le génie électrique en connaît de plus en plus (cf. les véhicules électriques et hybrides, les actionneurs dans les avions plus électriques, les smart-grids, ...) et ceci en permettant en améliorant les processus de conception dès les phases très initiales.

## 12. REFERENCES

[HAU-01] HAUGLUSTAINE, J. M. « Outil d'aide à l'optimisation de l'enveloppe de bâtiment, au stade de l'esquisse d'avant-projet », 16e colloque Université-Industrie Applications de l'électricité dans les locaux résidentiels, tertiaires & industriels, 14 juin 2001

[VIS-04] W. VISSER, "Dynamic Aspects of Design Cognition: Elements for a Cognitive Model of Design", INRIA, Rapport de recherche n° 5144 – Mars 2004 - 116 pages

[PEU] "Livre blanc sur les recherches en énergétique des Bâtiments", supervisé par B. Peuportier, Presse des Mines, ISBN: 9782356710512 (voir <http://www.pressesdesmines.com/developpement-durable/livre-blanc-sur-les-recherches-en-energetique-des-batiments.html>)

[DEB97] « L'éco-conception dans le génie électrique : application au cas du transformateur », V. Debussière, H. Ben Ahmed, B\*. Multon, Electrotechnique du Futur 2007

[DEL-07] "An Optimizer using the Software Component Paradigm for the Optimization of Engineering Systems", B. DELINCHANT et al., The International Journal for Computation and Mathematics in Electrical and Electronic Engineering", Vol. 26 No. 2, 2007, pp. 368-379

[POW-85] M. J. D. Powell, "On the quadratic programming algorithm of Goldfarb and Idnani", Mathematical Programming Study 25 (1985), pp. 46-61

[HA-10] L. D. Ha, S. Ploix, M. Jacomino, and H. Le Minh. Energy Management, chapter, "A mixed integer programming formulation of the home energy management problem", ISBN 978-953-307-065-0. INTECH, 2010

[WU-12] "Sketch Systemic Optimal Design Integrating Management Strategy, Thermal Insulation, Production And Storage Energy Systems (Thermal And Electrical): Application To An Energy- Positive Train Station", F. WURTZ, J. POUGET, X. BRUNOTTE, M. GAULIER, Y. RIFONNEAU, S. PLOIX AND B. L'HENORET, IBPSA 2013 - 13th International Conference of the International Building Performance Simulation Association, 25-28th August 2013, FRANCE (hal-00875)