



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

F. Wurtz¹, B. Delinchant¹, Van Dinh Binh¹, Julien Pouget², Xavier Brunotte³

- 1. G2ELAB (Université de Grenoble)**
- 2. SNCF - INNOVATION & RECHERCHE**
- 3. Vesta-System**



Plan de la présentation

I – Contexte & Besoin

- Energétique
- Besoin d'outils d'aide à la décision

II - Le concept d'esquisse énergétique

- L'esquisse en général
- Le concept d'esquisse énergétique en particulier et ses enjeux
- Défis et difficultés scientifiques

III – Modèles pour l'esquisse énergétique

- Pour les composants
- Pour le système bâtiment

IV - Outils utilisées

- L'optimisation et des modèles ad'hoc

V - L'exemple considéré: une gare à énergie positive

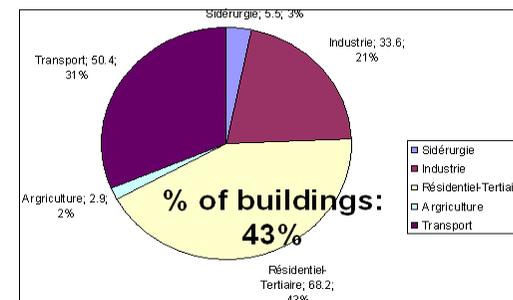
I - Contexte & Besoin

Le contexte énergétique dans la filière bâtiment

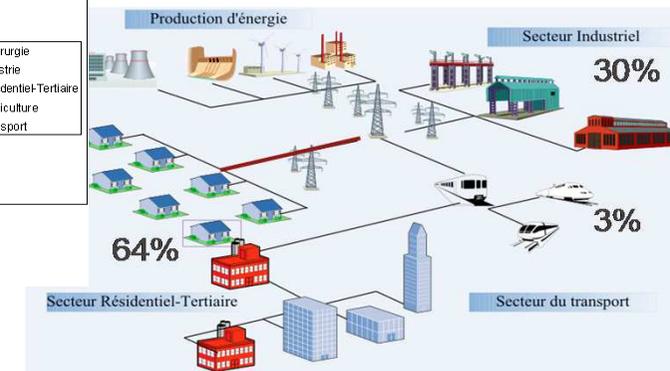
- 43% de la consommation d'énergie primaire
- 64% de la consommation d'Électricité

Besoin d'outils d'aide à la décision

- Investissements lourds
- A long terme (plus de 30 ans !)
- Multiplicité:
 - De solutions (PV, Co-générateur, Batterie, chaudière gaz, chaudière bois, ...)
 - De choix de technologies
 - De contraintes
- Avec des incertitudes sur:
 - Le coût des technologies
 - Le coût des énergies

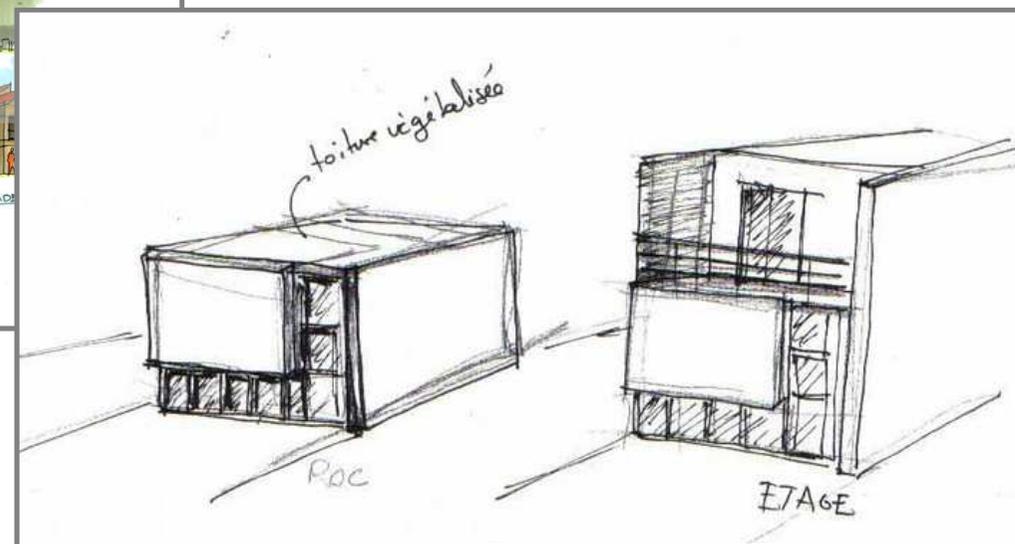
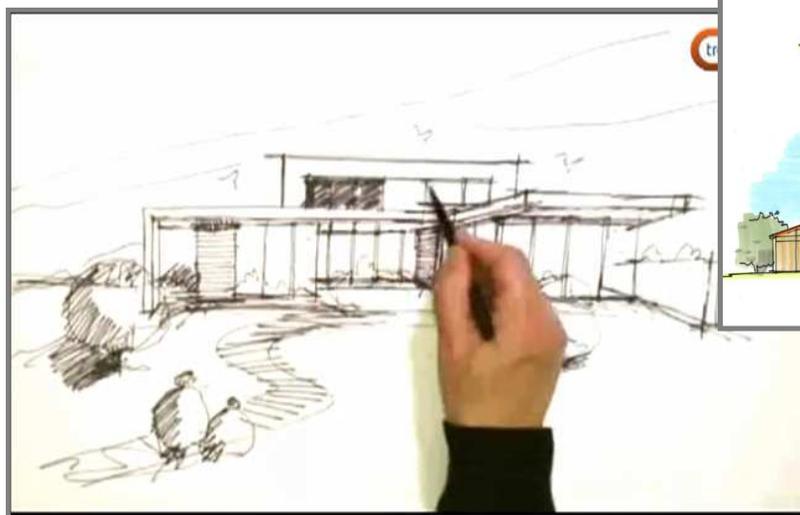


French final energy consumption 2005 (Mtep)



II - Le concept d'esquisse: Le concept en général

- **L'esquisse: une activité noble et valorisées pour les architectes dans la filière bâtiment**



- **Doit le devenir aussi pour les énergéticiens (Electriciens, thermiciens, ...)**
 - En définir la nature, valoriser son importance

II - Le concept d'esquisse: Le concept en général

Importance

Travaux depuis 1993 et en particulier 2004

- 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

VEGEP - 2011

Spécification fonctionnelle
VEGEP
- Outil de pré-dimensionnement énergétique Gare -

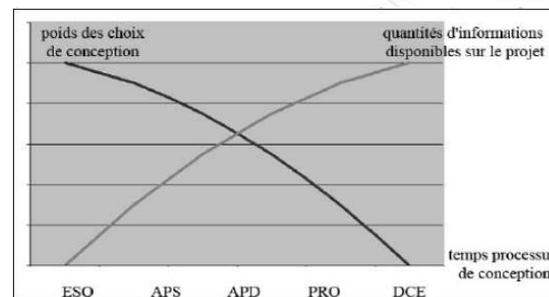


Figure 1 – Paradoxe de la conception (Adolphe, 1991)¹

Place

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

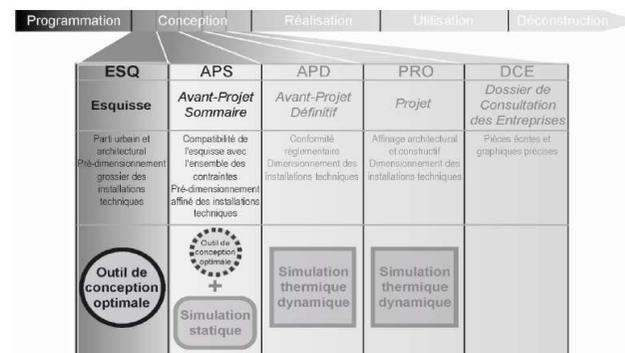


Figure 2 – Positionnement de l'outil dans la chronologie de la conception

Enjeux

- Identifier le concept,
- la place dans le processus de design,
- augmenter l'efficacité

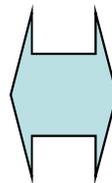
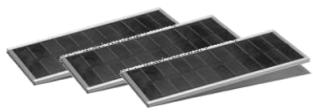
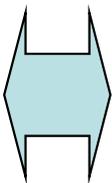
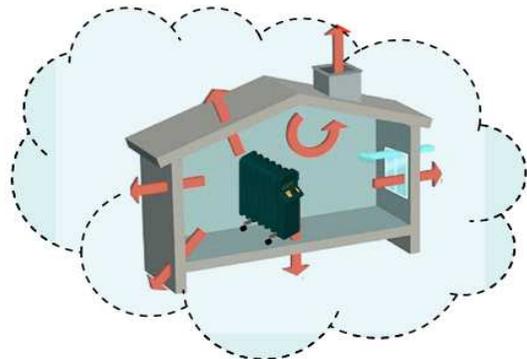
- Faire la jonction entre Les hommes de l'art (Les architectes), les décideurs
- Et les ingénieurs et les physiciens

Besoin d'outils (Optimisation) et de modèle adaptés! (Analytiques Et Semi Analytiques)

II - Le concept d'esquisse: Le concept d'esquisse énergétique en particulier

Dans le contexte d'un système bâtiment, et des systèmes hybrides du Génie Electrique en général (Véhicules, Avions, Actionneurs, ...)

Pouvoir esquisser simultanément

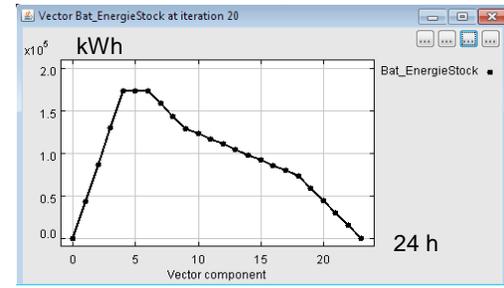


Chauffage, Ballon,
...

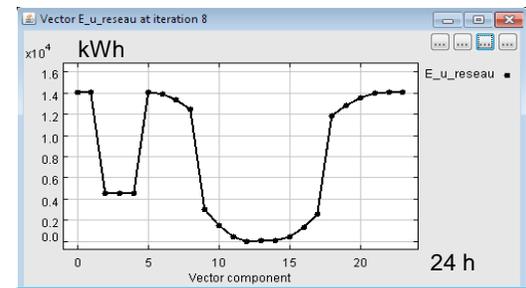
Les caractéristiques de l'enveloppes

La taille des systèmes énergétique

La stratégie de pilotage optimale



État de charge de la batterie au cours de la journée pour un coût d'investissement PV de 1100 €/m²



Électricité prise sur le réseau

Le faire simultanément car tout est couplé !

II - Le concept d'esquisse: Défis et difficultés scientifiques

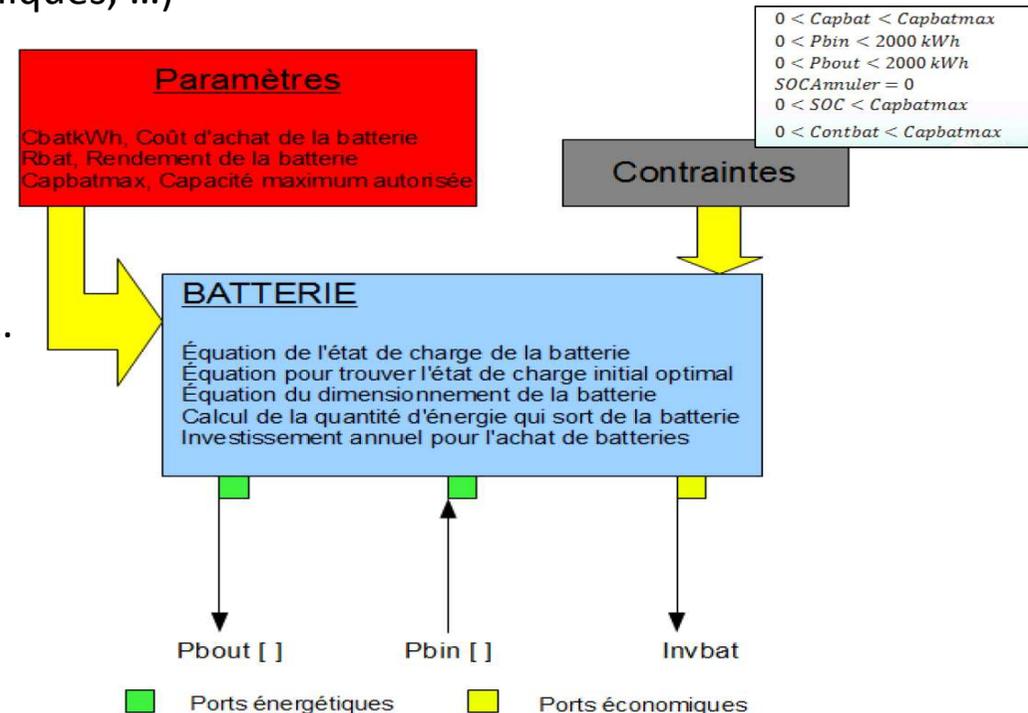
- **Peu ou pas d'outils pour la phase d'esquisse énergétique**
- **Phase et concept pas ou mal reconnu dans le monde de l'ingénierie**
- **Certainement du à des difficultés fondamentales inhérentes à cette phase**
 - le système n'est pas encore descriptible et connu dans ses détails
 - s'appuyer cependant sur des outils et des modèles de calcul:
 - suffisamment pertinents pour permettre des itérations et des études d'alternatives intéressantes (par les concepteurs, par les outils d'optimisation, ...)
 - tout en étant pas trop fins, ce qui est inutile et impossible, puisque le système n'est pas encore connu lui-même avec finesse
 - tout en permettant néanmoins de raisonner, entre autres, sur la durée de vie du système
 - qui est de plusieurs décennies pour un bâtiment
 - pour « esquisser » les coûts d'exploitation
 - en plus des coûts d'investissements

III – Modèles pour l'esquisse énergétique: pour les « composants » du système

Modèle au niveau du composant

- Une dimension physique
 - Relier les dimensions physiques aux performances énergétiques
 - Les flux énergétiques entre eux (électriques, thermiques, ...)
- Une dimension économique
 - Investissement + Maintenance + Exploitation
- Des contraintes
 - Sur la taille, le fonctionnement des équipements, ...

Exemple: Structure d'un modèle de batterie



III – Modèles pour l'esquisse énergétique: pour les « composants » du système

Exemple de la batterie

Modèle de la batterie



- Détail des équations
 - Equation de l'état de charge de la batterie
 - Pour $i \in [0;23]$: $SOC[i+1]=SOC[i]+Pbin[i]*Rbat-Pbout[i]/Rbat$;
 - Equation à annuler pour trouver l'état de charge initial
 - $SOCAnnuler=SOC[0] - (SOC[23] + Pbin[23]*Rbat - Pbout[23])/Rbat$;
 - Equation du dimensionnement de la batterie
 - Pour $i \in [0;23]$: $Contbat[i]=Capbat-SOC[i]$;
- Investissement annuel pour l'achat de la batterie
 - Pour $i \in [0;23]$: $Ibat=365 * \sum Pbout[i] * CbatkWh$



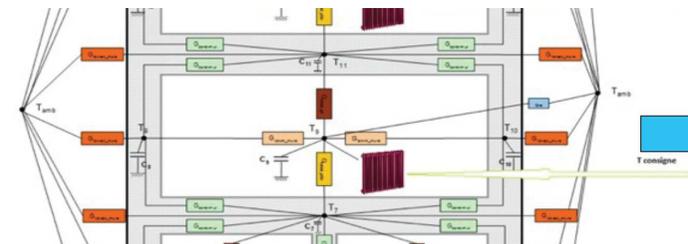
Exemple de l'enveloppe (vue comme un composant)

Besoin de chauffe moyens sur la saison:

- En fonction des caractéristiques des murs et de fenêtres

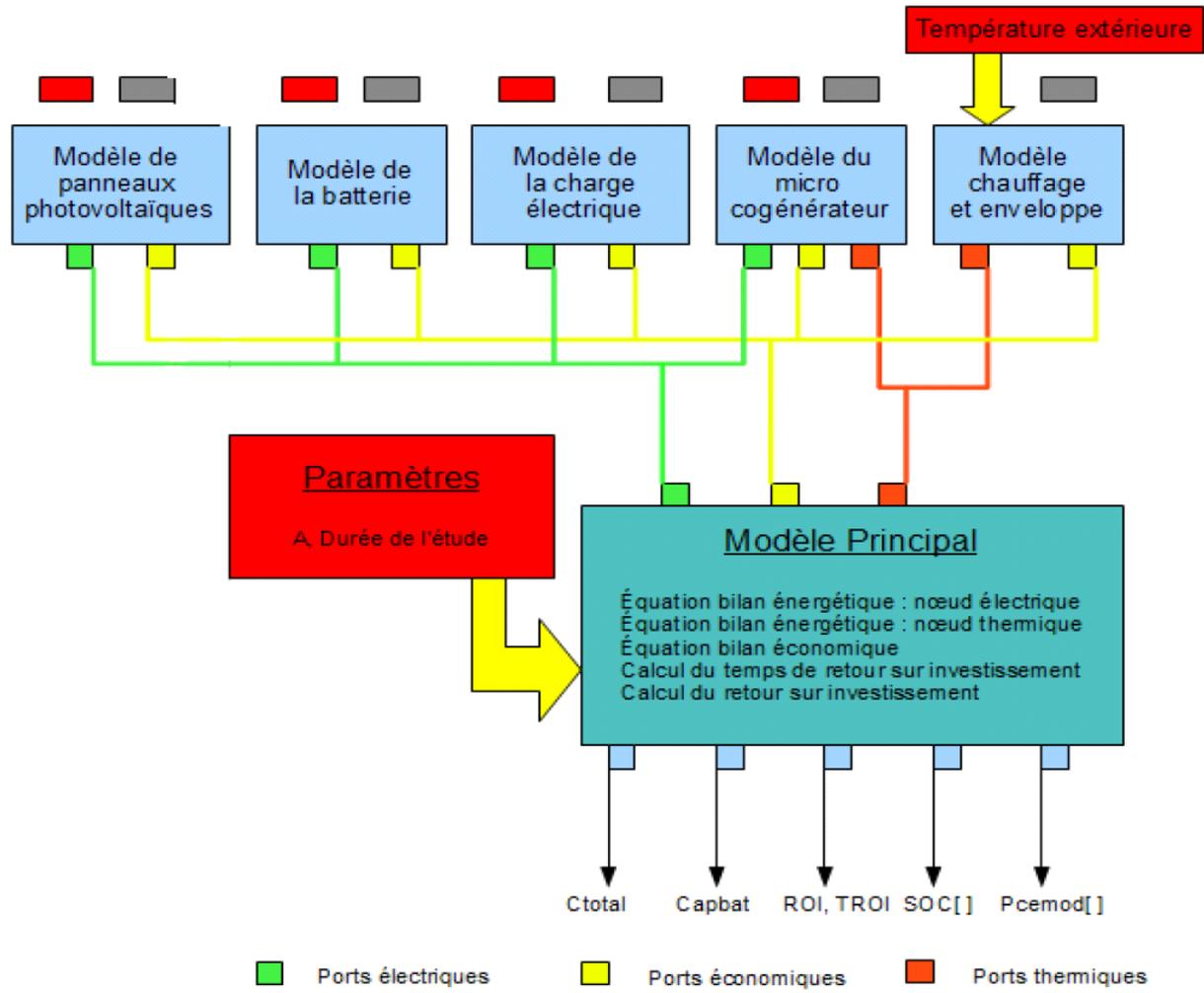
Pour calculer les besoins de chauffe sur les journées types:

- Schémas équivalents à constantes localisées



III – Modèles pour l’esquisse énergétique: pour les « composants » du système

Composition à l’échelle du système



Composition des équations & des contraintes à l’échelle du système Via

- Des ports
 - Physiques
 - électriques, thermiques
 - Economiques
 - A l’échelle du système
- ### Un problème d’optimisation
- Des équations
 - Des contraintes
 - Une fonction objectif

Des modèles avec très vite plusieurs centaines de paramètres et de contraintes (cf. les journées types)

IV - Outils utilisées

Outil d'optimisation: Suite logicielle CADES

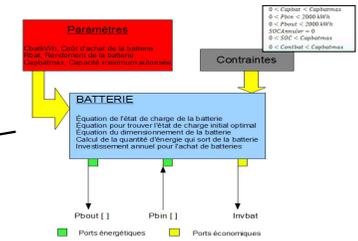


Description des modèles
des composants

```

Component Generator - 2.9
File Tools Options Config Help
-----
1. /* Modèles de la batterie */
2. /* Calcul de l'état de charge de la batterie */
3. /* [0] */
4.
5.
6.
7. Bat_EnergieStockee[1]=Bat_EnergieStockee[0]+Bat_EnergieEntrant
8. _Rendement_convertisseur;
9.
10. Bat_EnergieStockee[2]=Bat_EnergieStockee[1]+Bat_EnergieEntrant
11. _Rendement_convertisseur;
12.
13. Bat_EnergieStockee[3]=Bat_EnergieStockee[2]+Bat_EnergieEntrant
14. _Rendement_convertisseur;
15.
16. Bat_EnergieStockee[4]=Bat_EnergieStockee[3]+Bat_EnergieEntrant
17. _Rendement_convertisseur;
18.
19.
20.
-----
Batterie[1]
System output
    
```

Equations



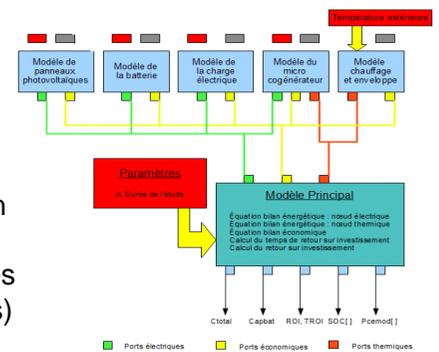
Composition à l'échelle du système
- équations & contraintes

```

Component Generator - 2.9
File Tools Options Config Help
-----
1. Imports
2.
3.
4.
5.
6.
7.
8.
9.
10.
11.
12.
13.
14.
15.
16.
17.
18.
19.
20.
-----
Modèle global
    
```

Imports

Equations
composition
via ports
(Energétiques
- Financiers)



Optimisation à l'échelle du système

Component Database - V.3: Cade (1) (6/20/2011, 2:43:30)

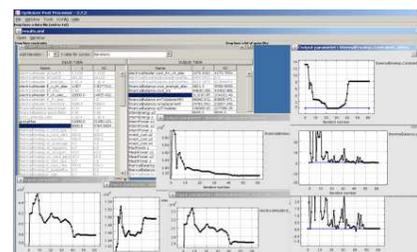
Optimize Message : Objective value = 209971.09959302021

Iteration : with the required precision.
Best Result = 1/1

Input name	Input value	Output name	Output value
A_cout_pv_kwh	0.150000	0 Bat_dim	...
A_cout_pv_kwh	0.150000	0 Bat_EnergieStock	...
A_cout_pv_kwh	0.150000	0 Bat_EnergieStock_Activer	0.03379
A_cout_pv_kwh	0.150000	0 Cap	200000
A_cout_pv_kwh	0.150000	0 Cpb	80000
A_cout_pv_kwh	0.150000	0 Charge_electrique_rendue	...
A_cout_pv_kwh	0.150000	0 Coefficient	...
A_cout_pv_kwh	0.150000	0 Coefficient_2	0.0
A_cout_pv_kwh	0.150000	0 Contraintes_cpb	...
A_cout_pv_kwh	0.150000	0 cost_inv	1000176
A_cout_pv_kwh	0.150000	0 cost_inv_soc	241316
A_cout_pv_kwh	0.150000	0 cost_maintenance	87.0588
A_cout_pv_kwh	0.150000	0 cost_replacement	4265
A_cout_pv_kwh	0.150000	0 E_soc_min	...
A_cout_pv_kwh	0.150000	0 E_soc_max	...
A_cout_pv_kwh	0.150000	0 Equilibre_f_u_chauffage	0.0000
A_cout_pv_kwh	0.150000	0 Equilibre_f_u_elec	0.0000
A_cout_pv_kwh	0.150000	0 GES_suff	15581.200

Gestion des équations,
contraintes et objectifs

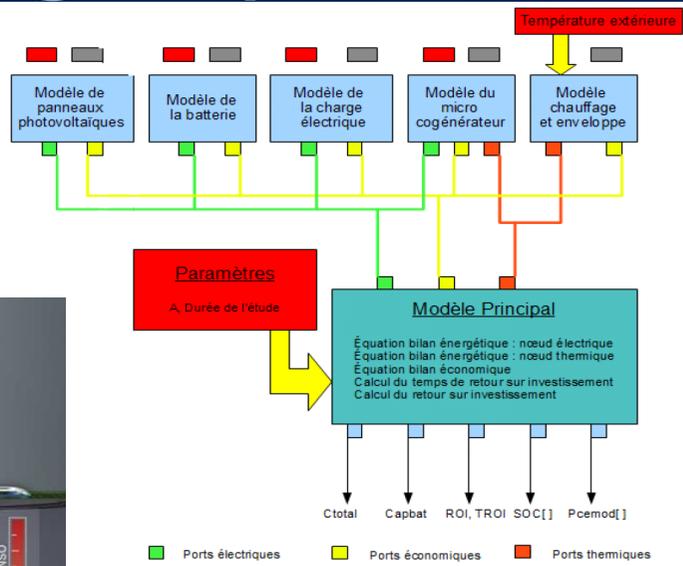
Exploitation



Visualisation

V - L'exemple considéré: une gare à énergie positive

Projet VEGEP



$$P1 \Rightarrow \begin{cases} \min fob(E,P) \\ E_j \text{ avec} \\ S_{max_i} \leq S_i(E,P) \leq S_{max_i} \\ E_{min_j} \leq E_j \leq E_{max_j} \end{cases}$$

- Méthodes:
- Déterministes (Gradient SQP)
 - Mais pourrait être
 - Non Linéaires
 - Stochastiques (Génétique, ...)

Problème que l'on résout

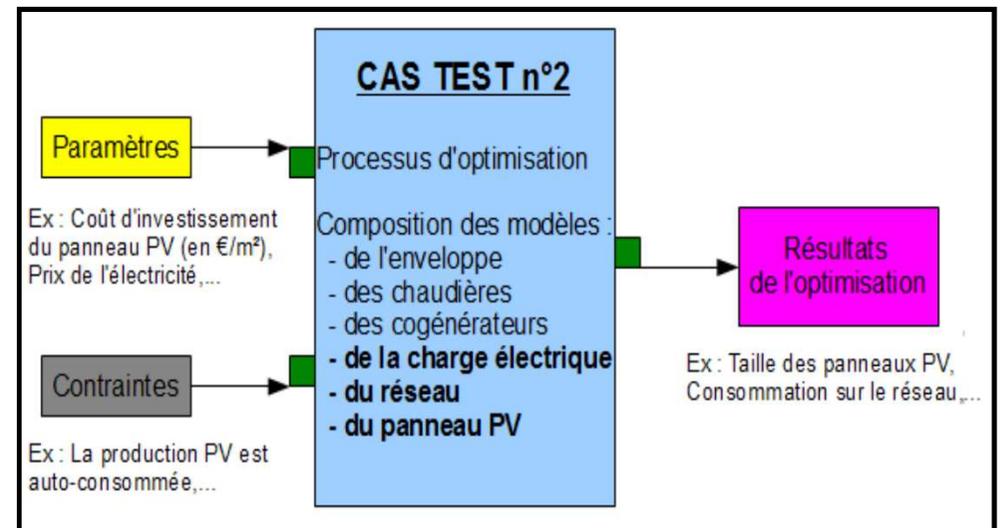
Fonction objectif =

Coût globale

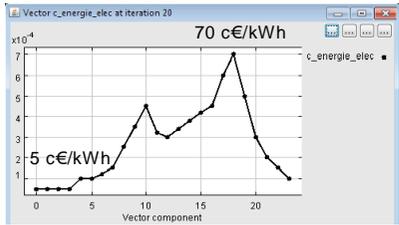
- Investissement

- Maintenance

- Exploitation



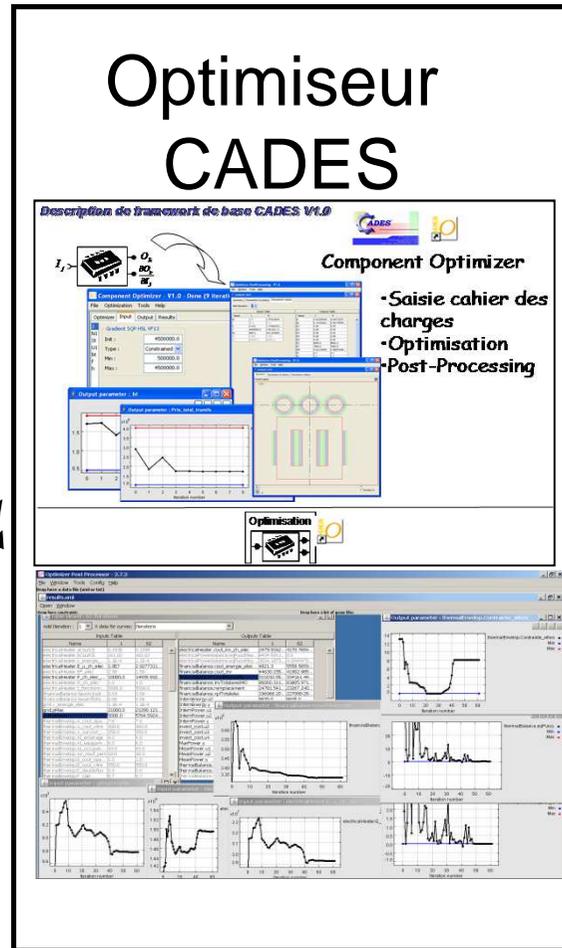
V - L'exemple considéré: une gare à énergie positive



- Tarif dynamique de l'énergie
- Superficie
- Coût des technologies - Bâti - Système (PV, Batterie, chaudières, co-générateurs, ...)
- Durée de vie (30 ans)
- Taux d'actualisation
- Journées type de fonctionnement

Optimiseur CADES

Description de framework de base CADES V1.0

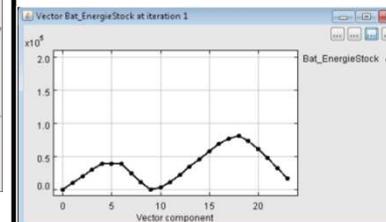


Component Optimizer

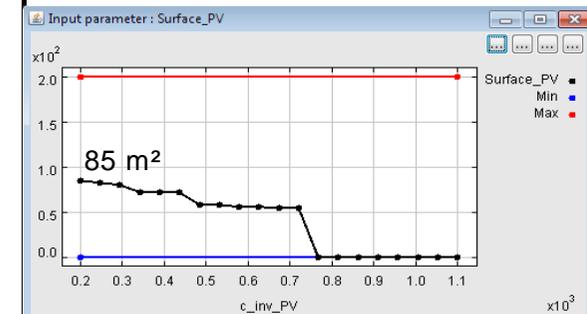
- Saisie cahier des charges
- Optimisation
- Post-Processing

Optimisation

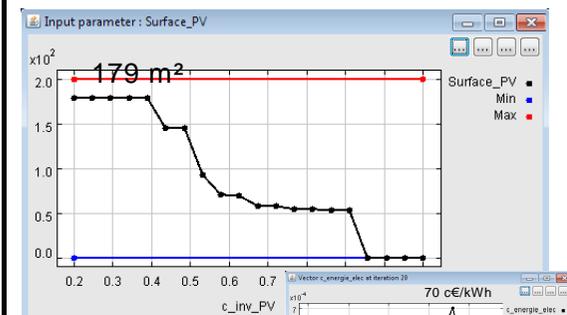
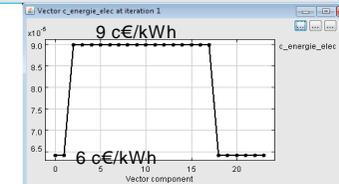
- Caractéristiques optimales
- Enveloppes
- Systèmes
- Stratégie de gestion



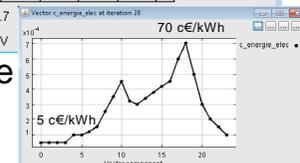
Résultats d'optimisation paramétrés



Tarif jaune



Tarif dynamique



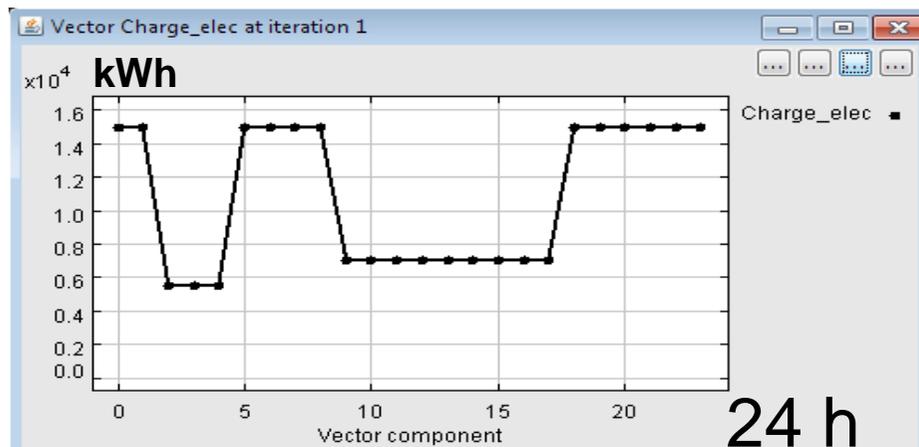
Des optimisations avec plusieurs centaines de paramètres et de contraintes
Temps: la dizaine de seconde

L'exemple considéré: une gare à énergie positive

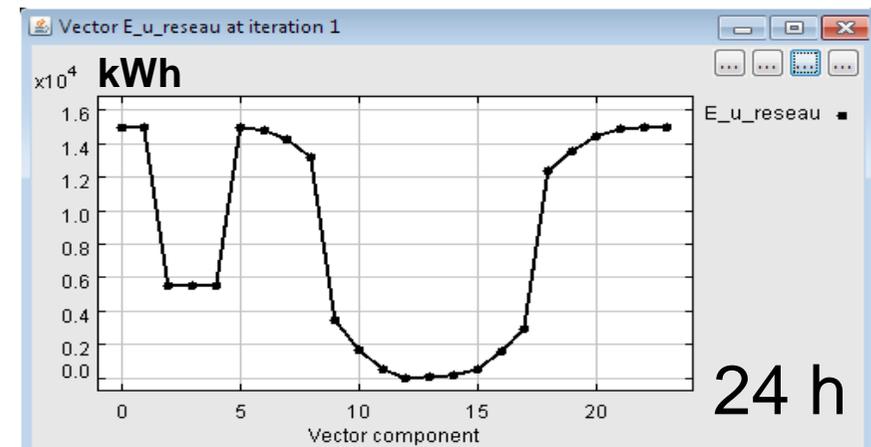
Focus sur des résultats d'optimisation

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

Intérêt de maximiser la production photovoltaïque

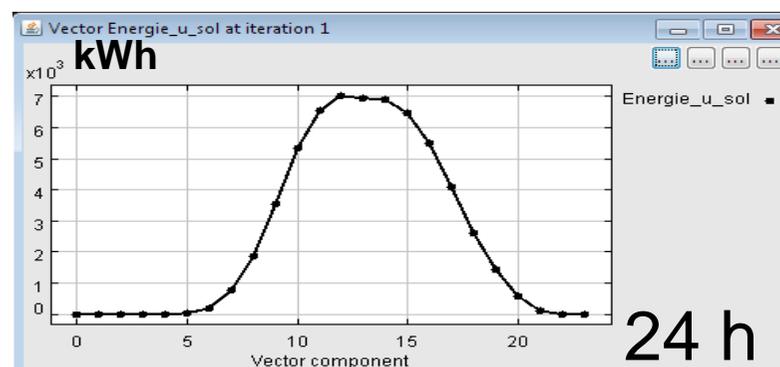


Consommation électrique de la gare



Électricité prise sur le réseau

Rappel



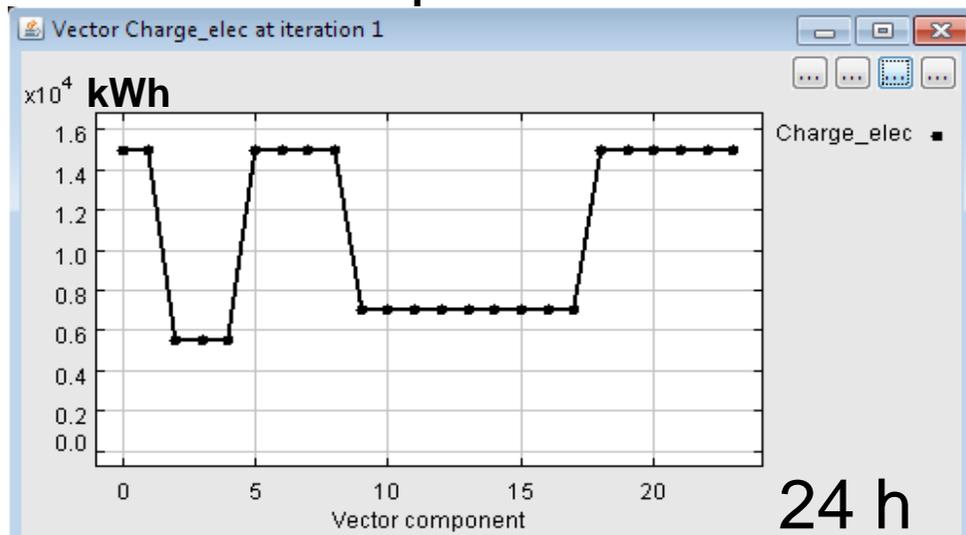
Production photovoltaïque

L'exemple considéré: une gare à énergie positive

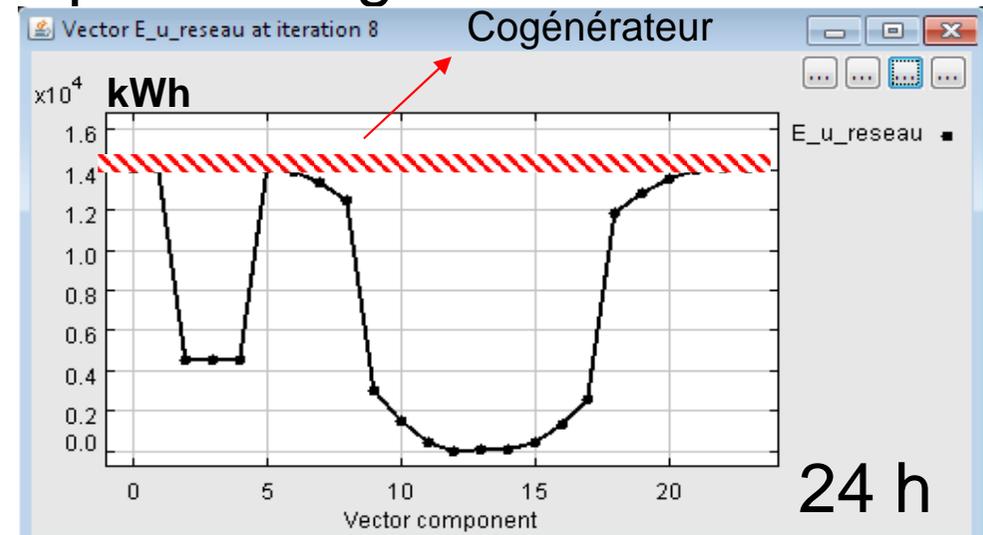
Focus sur des résultats d'optimisation

$$450 \text{ €/m}^2 \leq c_{\text{inv_PV}} \leq 750 \text{ €/m}^2$$

Intérêt de remplacer la chaudière bois par un cogénérateur

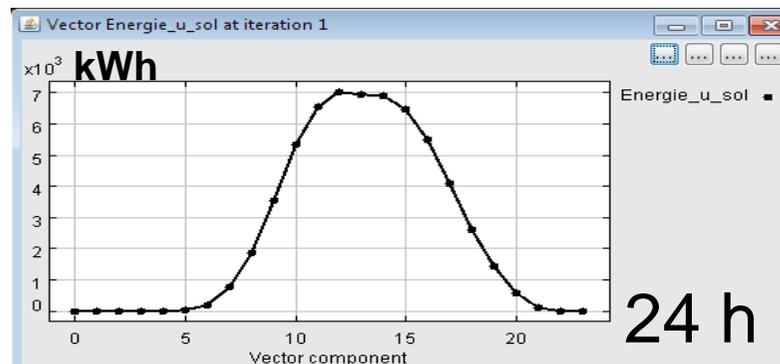


Consommation électrique de la gare



Électricité prise sur le réseau

Rappel

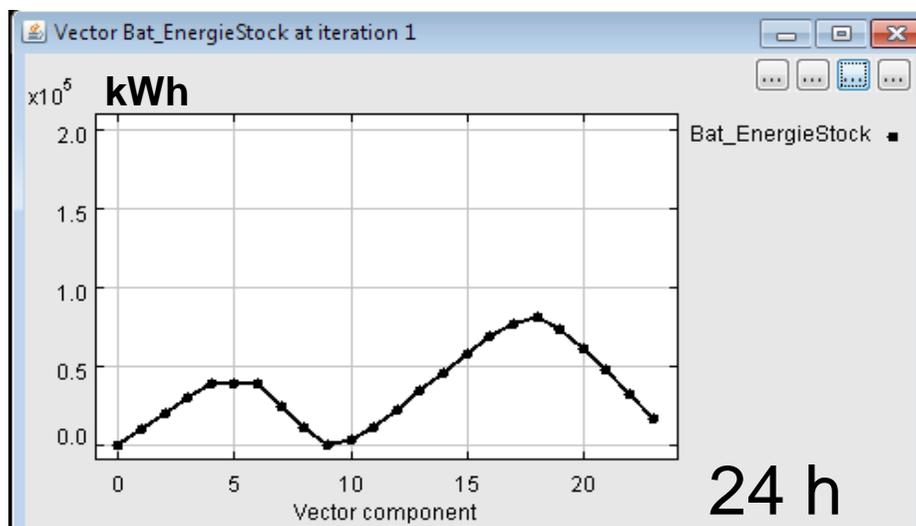


Production photovoltaïque

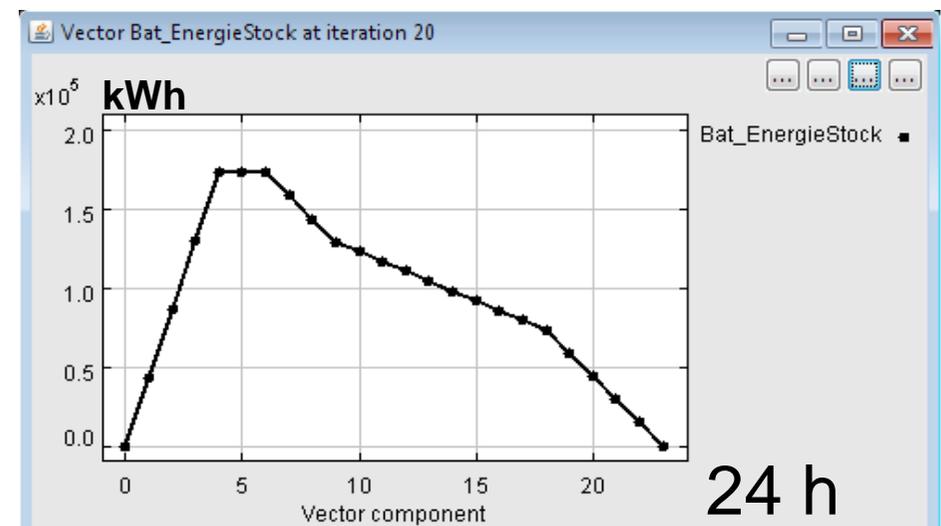
L'exemple considéré: une gare à énergie positive

Focus sur des résultats d'optimisation

La stratégie de gestion de la batterie (sur journée type de fonctionnement)

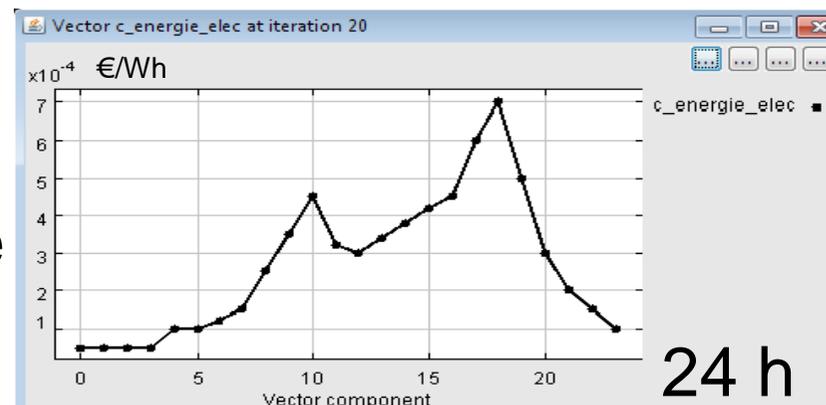


État de charge de la batterie au cours de la journée pour un coût d'investissement PV de 200 €/m²



État de charge de la batterie au cours de la journée pour un coût d'investissement PV de 1100 €/m²

Rappel
Tarif dynamique
utilisée

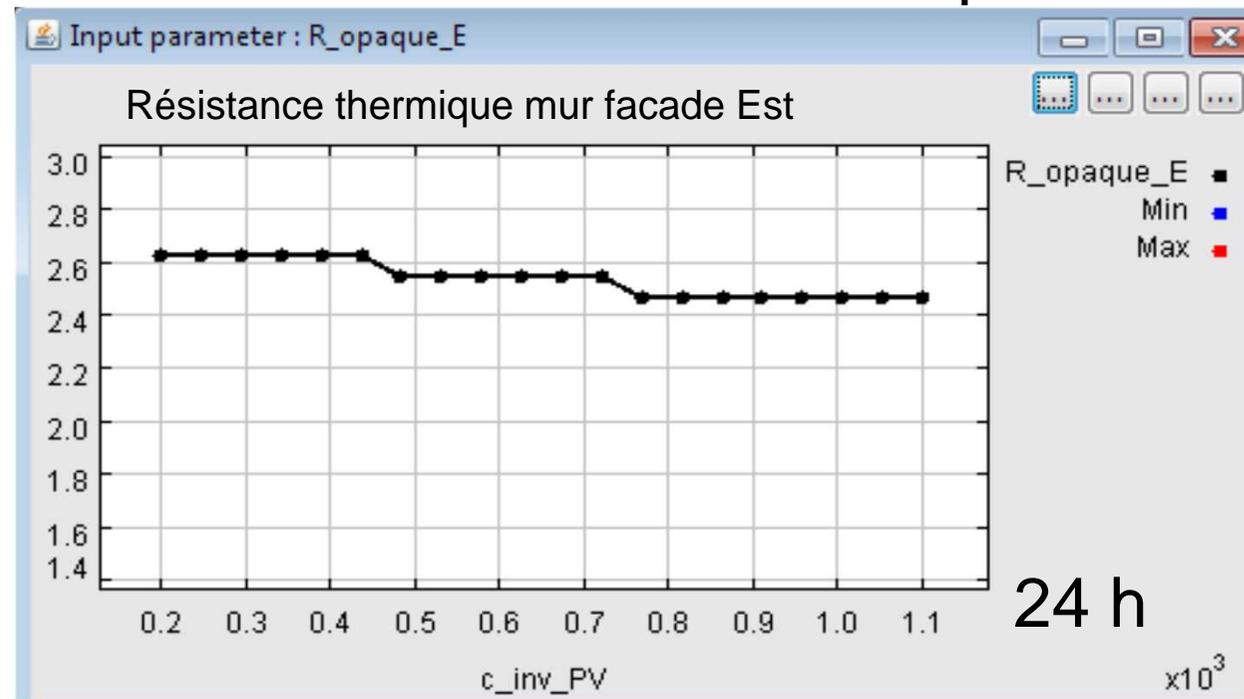


L'exemple considéré: une gare à énergie positive

Focus sur des résultats d'optimisation

Autre résultat intéressant

Évolution de la résistance thermique des murs



Dimensionnement simultanée des caractéristiques de l'enveloppe

Avec:

- La taille des système & la stratégie de gestion**

Conclusion

■ Importances des phases d'esquisses

- A valoriser chez les ingénieurs (comme chez les architectes ?)
- Faire la jonction entre les 2 approches et les 2 mondes

■ Proposition d'outils basés sur:

- Des modèles d'esquisses (Mariant équations & contraintes) avec niveau de modélisation ad'hoc
- Composés à l'échelle du système via des ports (énergétiques et financiers)
- Introduisant les techniques d'optimisation dès la phase d'esquisse

■ Il ne s'agit d'outils prédictifs !

■ Mais d'outils d'aide à la décision pour:

- Tester et quantifier la formulation des problèmes
 - Gestion des hypothèses, des alternatives
 - Tester en phase d'esquisse des scénarios basés sur Des hypothèses
 - Sur les coûts de l'énergie
 - Sur les coûts des technologies
- Se forger une conviction (pour les décideurs, les concepteurs, ...)

■ Tout en gérant beaucoup de paramètres et de contraintes

- Plusieurs centaines à plusieurs milliers (cf. journées types)