

TRANSITION ÉNERGÉTIQUE DANS LE BÂTIMENT À L'ÉCHELLE DES TERRITOIRES

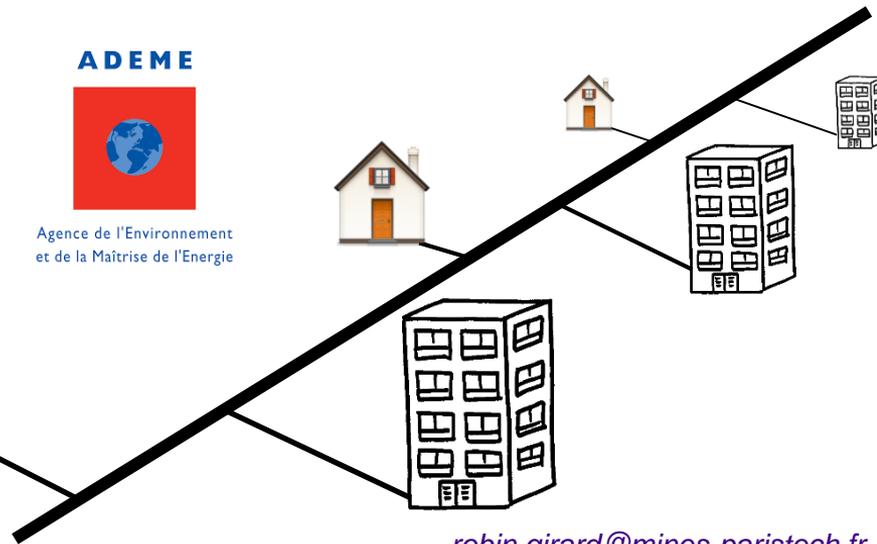
Antoine Rogeau et Robin Girard ERSEI Group, MINES ParisTech, Centre PERSEE
Yassine Abdelouadoud, Mathieu Thorel, Eunice Herrera, CSTB.
Nicolas Kong, ENEDIS



ADEME



Agence de l'Environnement
et de la Maîtrise de l'Énergie



Plan - La transition énergétique dans le bâtiment

- **Partie 1** : de l'échelle nationale à l'échelle du distributeur d'électricité.
 - I-A. Parc bâti et transition énergétique à l'échelle nationale
 - I-B. Evolution des pointes dans le réseau de distribution d'électricité

Nicolas Kong, ENEDIS



- **Partie 2** : construire une vision de parc de l'échelle nationale au territoire
 - 2-A. Modéliser la consommation de chauffage à l'échelle du territoire
 - 2-B. Modéliser un plan de rénovation
 - 2-C. Optimisation un plan de rénovation à l'échelle du territoire

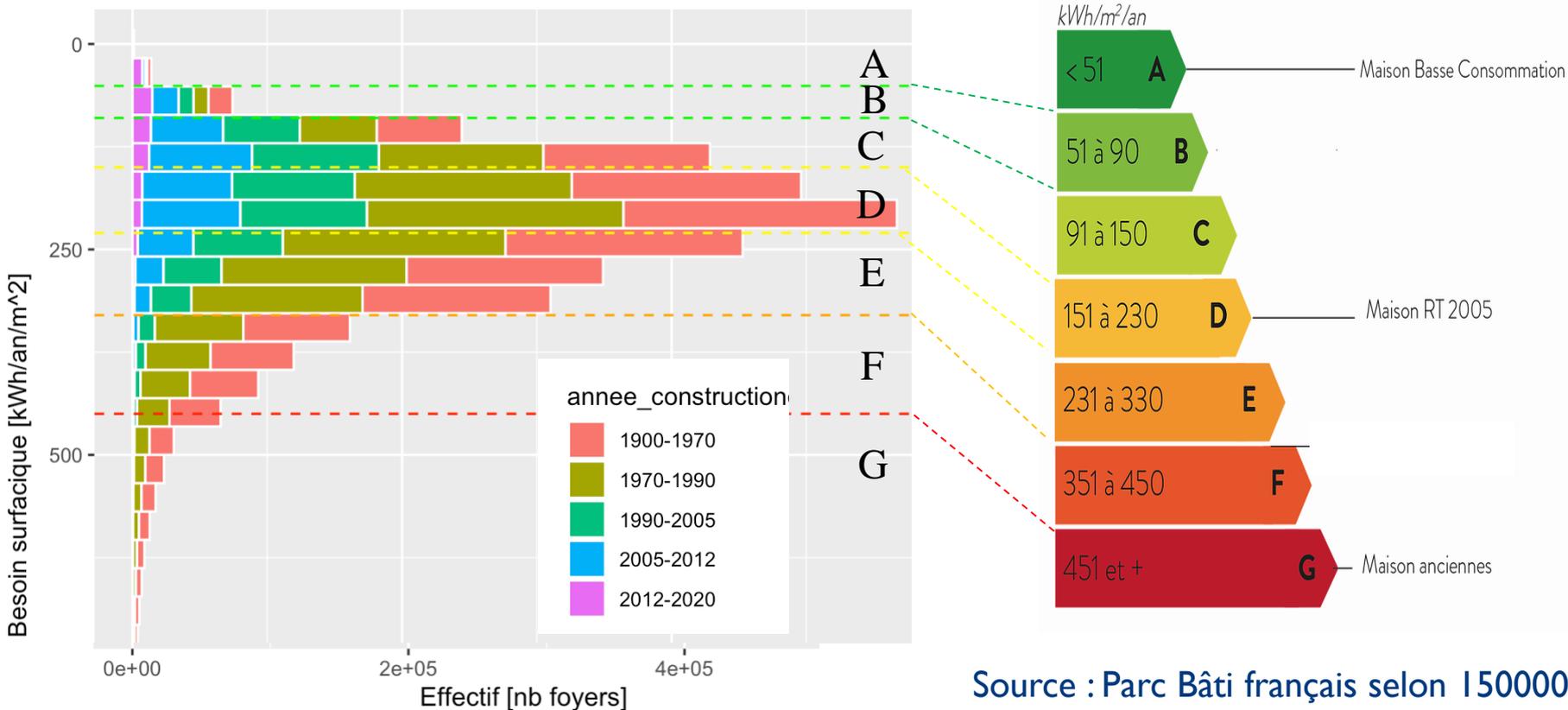
Yassine Abdelouadoud, Mathieu Thorel, Eunice Herrera, CSTB.



PARTIE I : DE L'ÉCHELLE NATIONALE À L'ÉCHELLE DU DISTRIBUTEUR D'ÉLECTRICITÉ.

- I-A. Parc bâti et transition énergétique à l'échelle nationale
- I-B. Evolution des pointes dans le réseau de distribution d'électricité

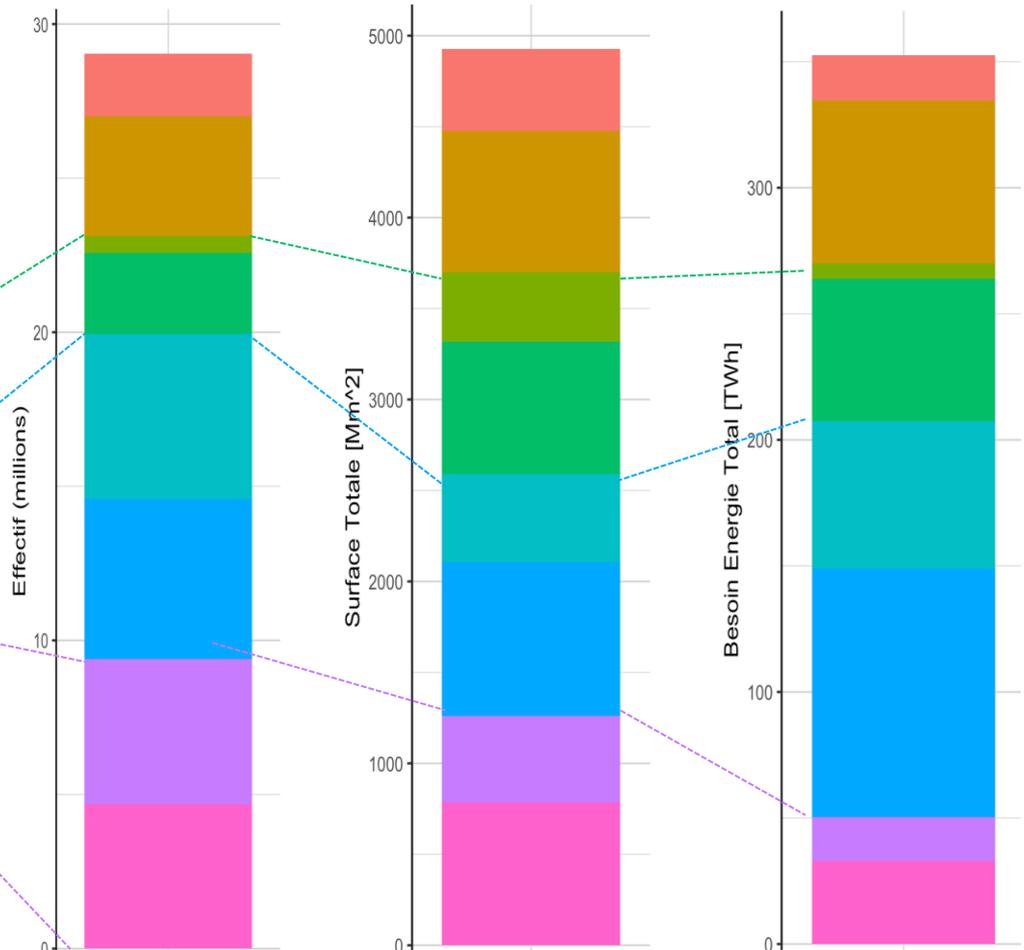
I-A. Echelle Nationale. Performances du parc résidentiel



Source : Parc Bâti français selon I500000 DPE (2018) en open data. Consommation estimée de chauffage + ECS + froid

I-A. Echelle Nationale. Mode de chauffage des RP

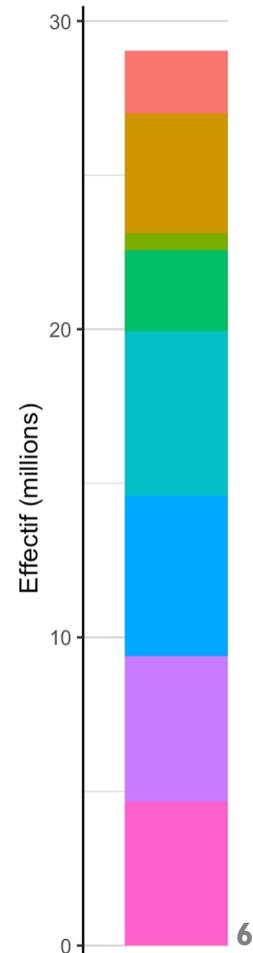
- Fuel - Type**
- Appartement - Autre
 - Maison - Autre
 - Appartement - Fioul
 - Maison - Fioul
 - Appartement - Gaz
 - Maison - Gaz
 - Appartement - Elec
 - Maison - Elec



Source : DPE x Recensement
| règles de trois

I-A. Echelle Nationale. Stratégie Nationale Bas Carbone

- **Décarboner le chauffage : 25 MTCO₂ → 3.5 MTCO₂**
 - Passage Elec + un peu de biogaz
 - Emissions (approchées) GES : Gaz - 220gCO₂/kWh, Fuel 270gCO₂/kWh Biogaz/Elec 60 gCO₂/kWh
 - Rénovation de tout le parc + RT sur le neuf
- **Orientation B1/ B2 :**
 - logement individuel (LI) : PAC (Elec/gaz) 50% en 2050
 - Logement collectif (LC) : réseaux de chaleur, PAC (Elec/gaz)
 - Rénovation complètes BBC :
 - 370000/an jusqu'en 2030, 700000/an après.
 - Eradication des « passoires thermiques »
 - d'ici le 1er janvier 2028



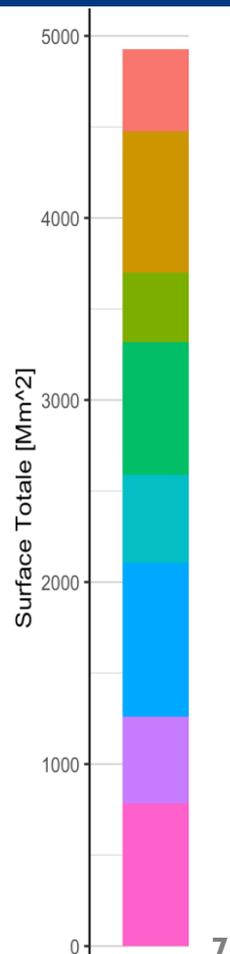
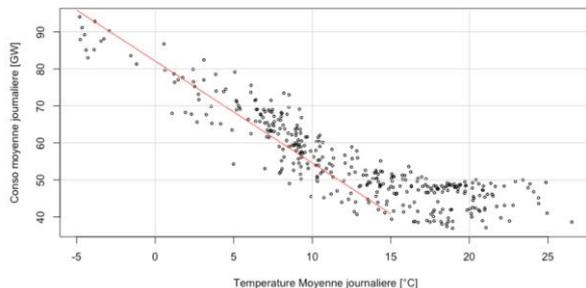
I-A. Echelle Nationale. Coût et contraintes de la transition

- Coûts

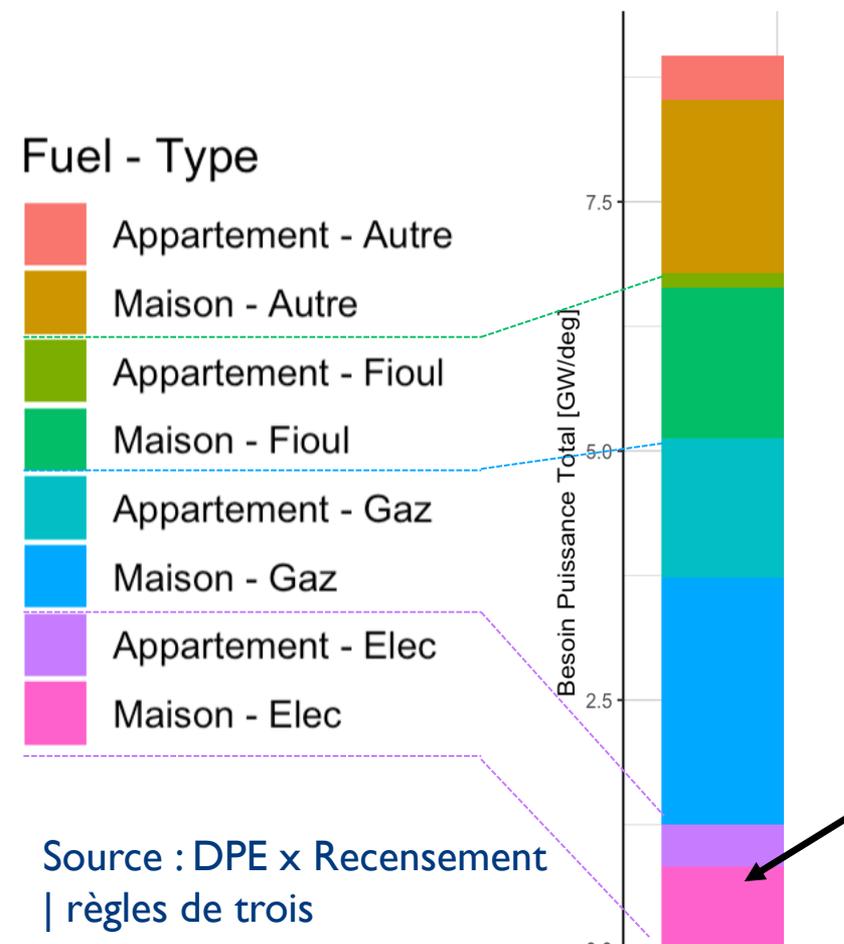
- Rénovation “complète” : $300 \text{ €/m}^2 \times 5000 \text{ millions m}^2$
→ 1500 milliards d'€ (50 milliard/an, SNBC estime 25 milliards/an)
- PAC : air-air $10 \text{ k€/PAC} \times 15 \text{ millions PAC} = 150 \text{ milliards d'€}$
- PAC hybride 15 k€/PAC

- Risques

- Epuiser le gisement -- Rénovation « pas à pas » inefficace, savoir où l'on va et y aller directement
- Risque de faire d'abord le moins cher --> les PAC
- Thermosensibilité



I-A. Echelle Nationale. Contrainte importante : puissance



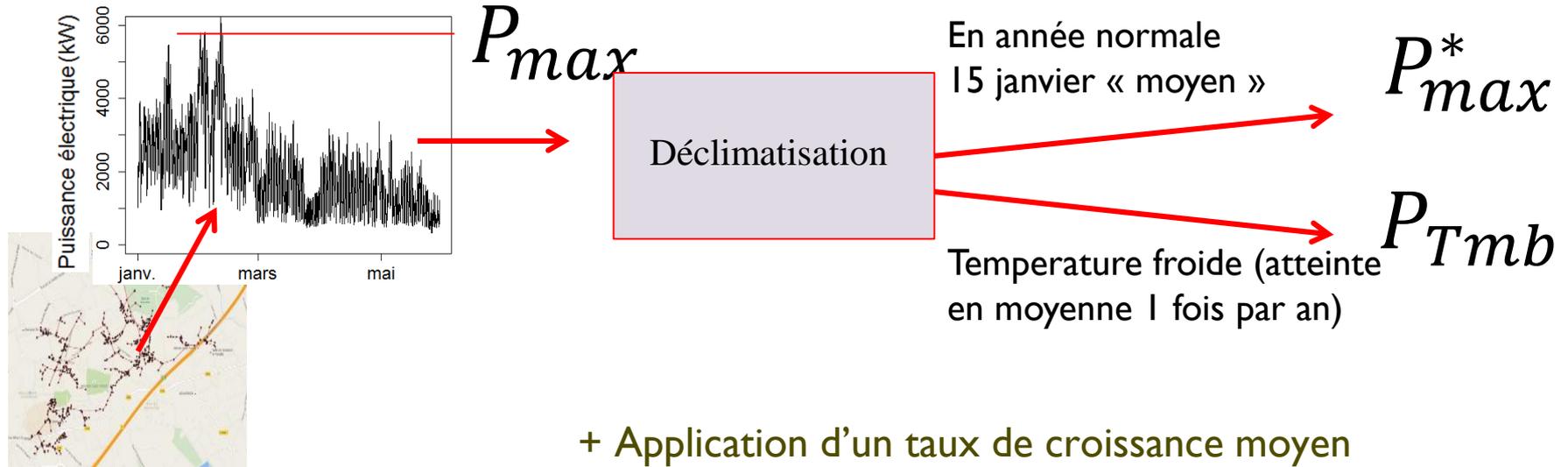
50% PAC sans rénovation :
+1GW/°C (COP hiver=2)
→ +15GW de besoin
pointes hiver
→ augmentation des
emissions de CO2
→ Perte de résilience

I-A. Echelle Nationale – pas assez fine !

- Limitation du calcul “grosse maille” :
 - Modèle de consommation chauffage grossier
 - Modèle de coûts de rénovation très grossier
 - Différents types de PAC
 - Particularités de chaque rénovation, Contraintes/opportunités archi/urbanistes.
- Les pointes dans le réseau de distribution d’électricité sont un enjeu majeur
 - Répartition des consommations pas uniforme (ni dans le temps ni dans dans l’espace)
 - Besoin de confronter ces évolutions à celles des autres usages

I-B. Réseau distribution. Méthodes actuelles de planification

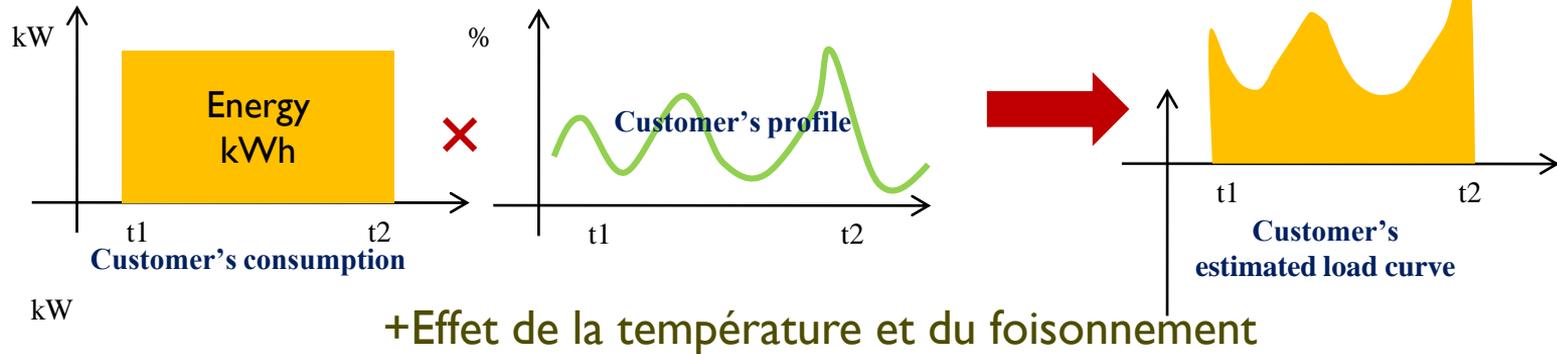
- Aujourd'hui deux méthodes :
 - HTA : Méthodes statistique reposant sur l'analyse des données observées (depart HTA) et un modèle de thermo-sensibilité



Source : superposition google map et tracé d'un réseau exemple

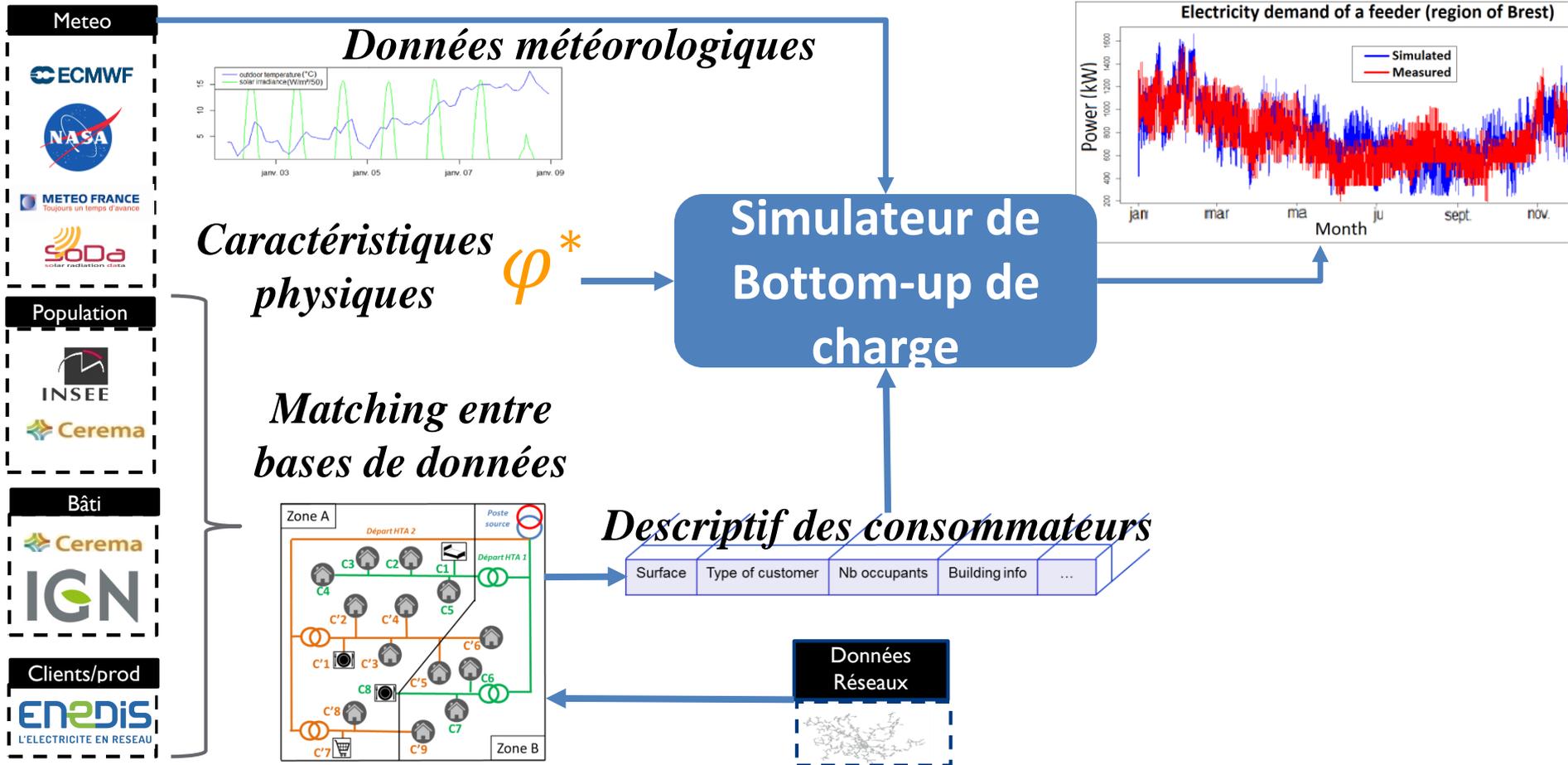
I-B. Réseau distribution. Méthodes actuelles de planification

- Aujourd'hui deux méthodes :
 - HTA : Méthodes statistique reposant sur l'analyse des données observées (depart HTA)
 - BT : profilage Baghera (panel de clients)



Que se passe-t-il si l'on développe de nouveaux usages ?

I-B. Réseau distribution. Principe de MOSAIC



I-B. Réseau distribution. Données des énergéticiens



- RTE/ENTSOE

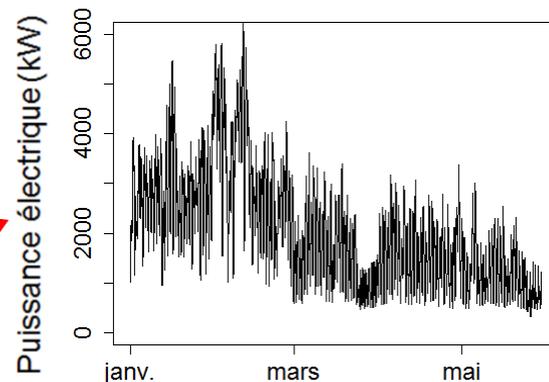
- Liste des centrales, postes sources, lignes aériennes caractéristiques techniques/localisation
- Par centrale/heure par heure : disponibilité, production
- Région par region/heure par heure : conso, prod éolien/PV

- GRDF/ENEDIS

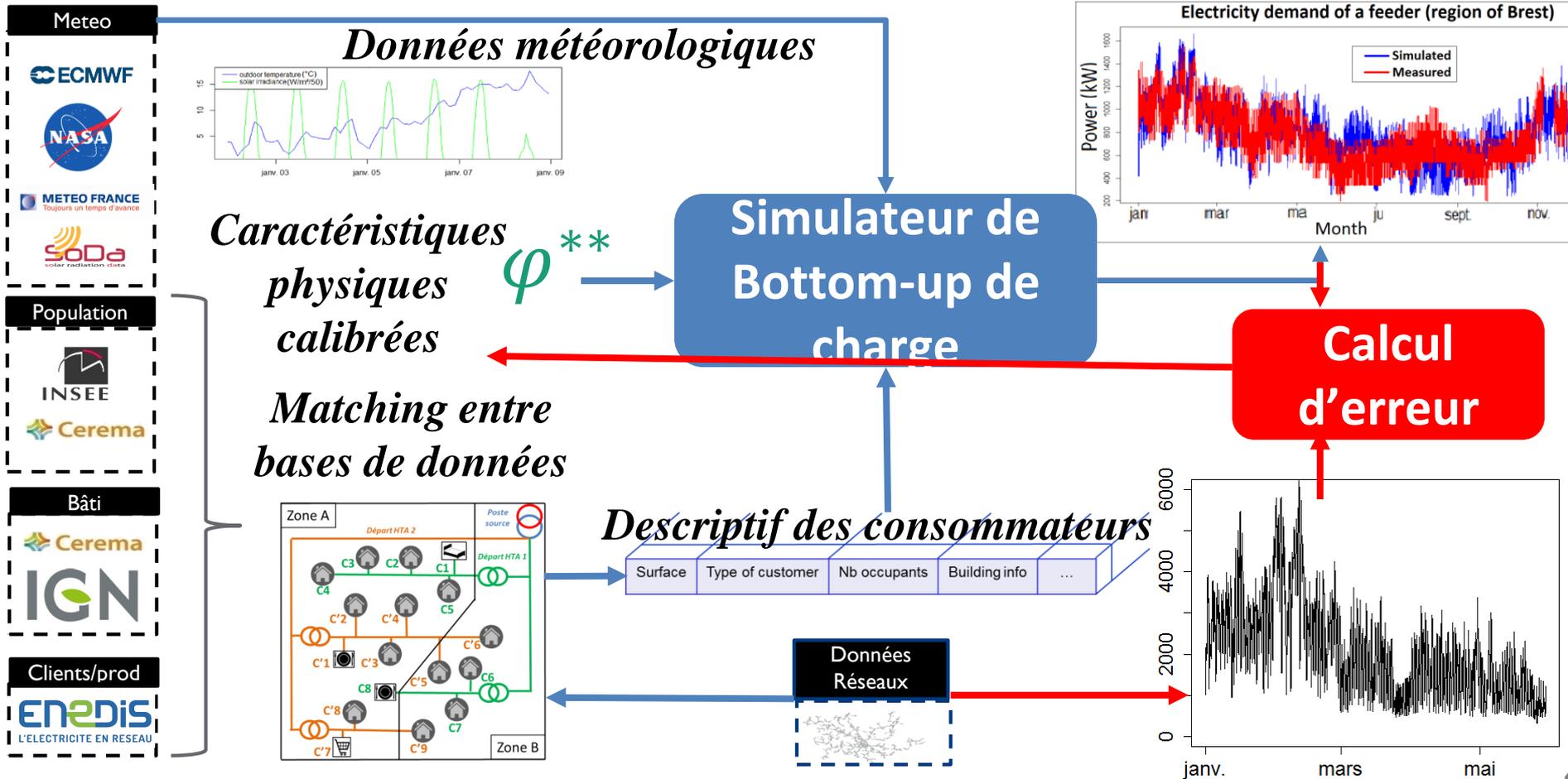
- OpenDATA : conso/thermosensibilité IRIS/10 bâtiments
- Mesures departs HTA (20000 departs, pas de temps 10 minutes depuis 2008)
- Linky/Gaspar
- Liste des clients – Psous, adresse, type, nom
- Index anciens compteurs



Source : superposition google map et tracé d'un réseau exemple

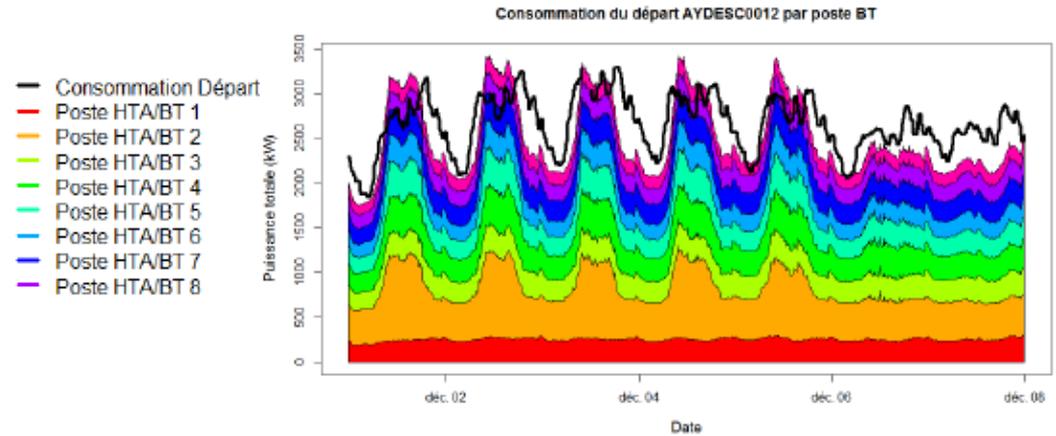


I-B. Réseau distribution. MOSAIC et data-mining

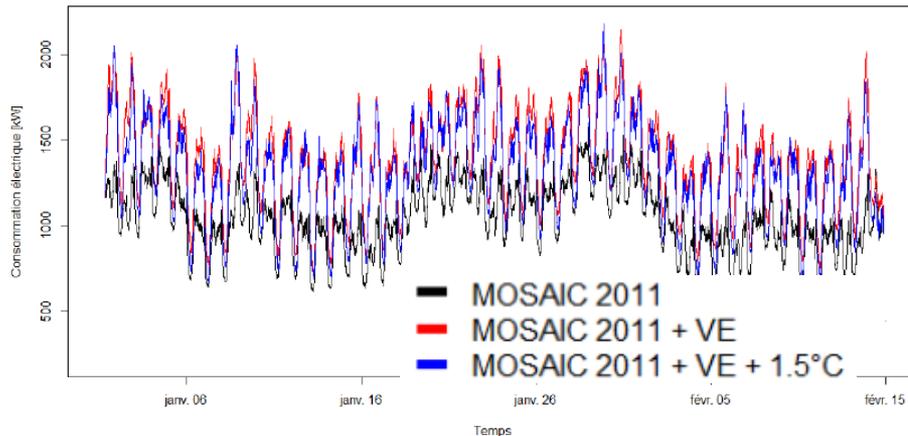


I-B. Réseau distribution. Génération de scénarios prospectifs

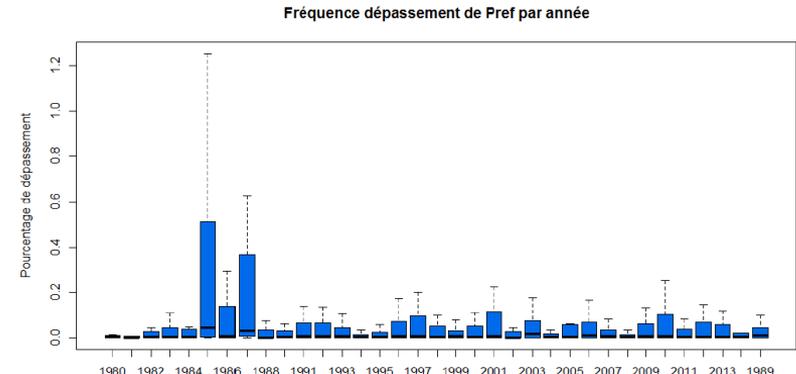
- Possibilité de variantes de simulation
- Simulation « monte-carlo » pour évaluer des risques
- Possibilité de générer n'importe quel sous-groupe de clients/usages



Différents scénarios VE/température



De dépassement de PTmp (%)



PARTIE 2 : CONSTRUIRE UNE VISION DE PARC DE L'ÉCHELLE NATIONALE AU TERRITOIRE

- 2-A. Introduction – Projet Shape
- 2-B. Modéliser la consommation de chauffage à l'échelle du territoire
- 2-C. Modéliser un plan de rénovation
- 2-D. Optimisation un plan de rénovation à l'échelle du territoire

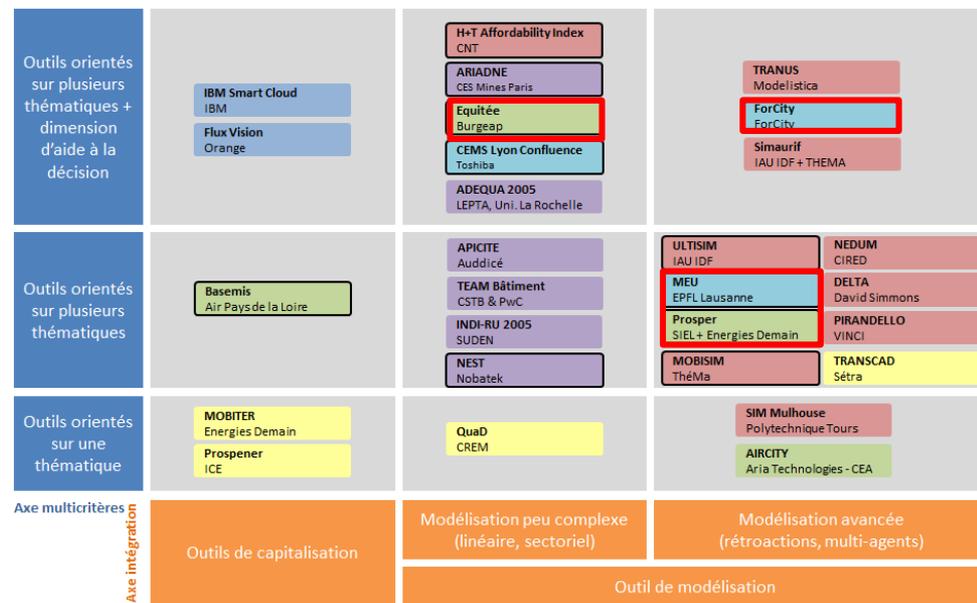
2-A. Introduction – Projet Shape

Cartographie des outils de modélisation territoriale

(ADEME, 2016)

Une aide à la planification limitée :

- Simulation de plans d'actions uniquement
- Le territoire doit proposer un plan d'action
- Aide à la **décision** : mettre en œuvre (ou non) un plan d'action pré-établi

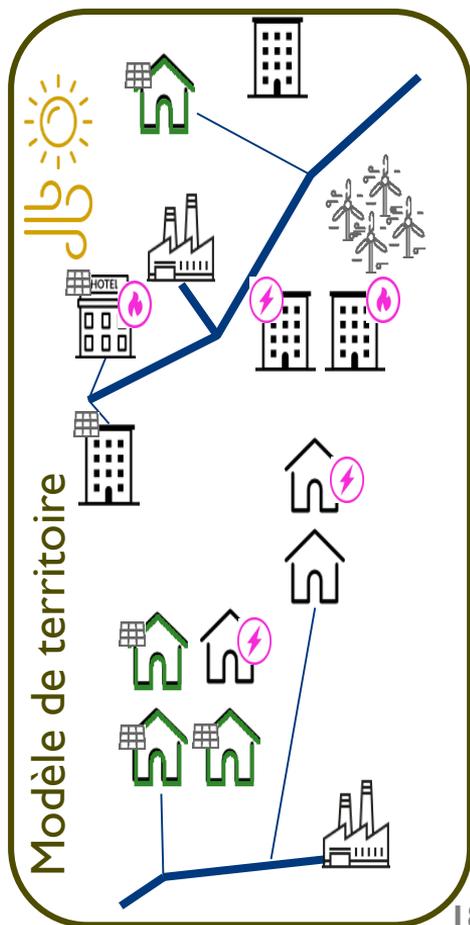


Cartographie des outils de modélisation territoriale. Source : ADEME (Bailly et al., 2016)

→ Pas d'outil proposant de plan d'action adapté

Outils orientés vers la consommation et la production d'énergie

2-A. Introduction – Projet Shape



Modélisation des solutions de rénovation de bâtiment et systèmes énergétiques

- Groupement de solutions cohérentes,
- Modèle de coûts



Outil d'optimisation

- Formalisation mathématique type « knapsack »
- Résolution rapide à grande échelle sur le territoire

Élaboration du plan d'action

- Rénovation thermique
- Remplacement systèmes énergétiques
- Énergies renouvelables



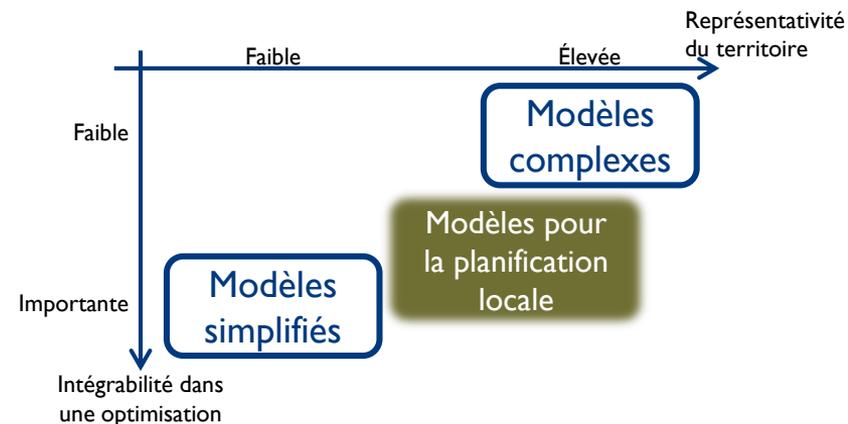
2-B. Modéliser le besoin de chauffage - Simplicité vs précision

La complexité des modèles doit être adaptée au contexte:

- Échelle territoriale
- Intégration dans un problème d'optimisation

Deux catégories d'optimisation identifiables en fonction des modèles utilisés

Représentativité : <ul style="list-style-type: none">• Des phénomènes physiques• De l'hétérogénéité		
Simplicité : <ul style="list-style-type: none">• De compréhension• D'intégration pour optimisation		
Modèles intégrés	Simplifiés	Complexes
Méthodes d'optimisation	Linéaire Quadratique	Black box (GA, PSO...)



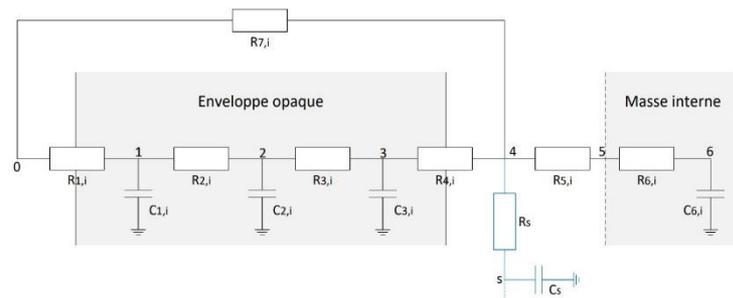
2-B. Modéliser le besoin de chauffage – modèle du bâtiment

À l'échelle du bâtiment → modèles dynamiques complexes (EnergyPlus)

- Données d'entrée fines
- Complexité des modèles

Échelle du quartier → simplification des modèles (MEU, CitySIM, Dimosim...)

- Modèles simplifié (R7C4)
- Modèles d'ombrage (tracé de rayon)
- Représentativité du comportement dynamique



Encore trop complexe pour une utilisation en optimisation
(non-linéarité et temps de calcul)

→ Développer un modèle physique simplifié intégrable dans un outil
d'optimisation territoriale

2-B. Modéliser le besoin de chauffage – base

Modèle physique mais simplifié → Steady-state

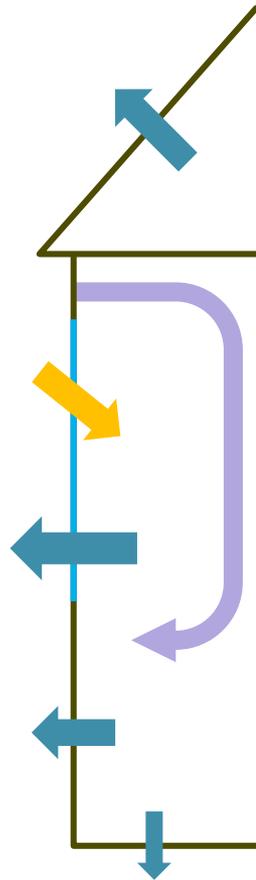
(Asadi et al., 2012) (Su et al., 2019)

Parois : $q_{\text{parois}}^b(t) = (T_{\text{in}} - T_{\text{ext}}(t))^+ \sum_{p \in P} u_p^b A_p^b$

Ventilation : $q_{\text{vent}}^b(t) = (T_{\text{in}} - T_{\text{ext}}(t))^+ \frac{c_{\text{air}}}{3.6} \tau_{\text{vent}}^b V^b$

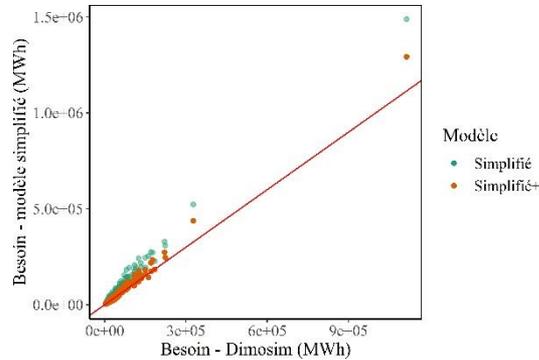
Gains solaires : $q_{\text{gain}}^b(t) = J(t) \Delta T^+ \sum_{p \in P} g_p^b A_p^b \delta_p^b$

$$\begin{aligned} Q^b &= \sum_t \left(q_{\text{parois}}^b(t) + q_{\text{vent}}^b(t) - q_{\text{gain}}^b(t) \right) \\ &= DHU \left(\sum_{p \in P} u_p^b A_p^b + \frac{c_{\text{air}}}{3.6} \tau_{\text{vent}}^b V^b \right) - IHU \sum_{p \in P} g_p^b A_p^b \delta_p^b \end{aligned}$$



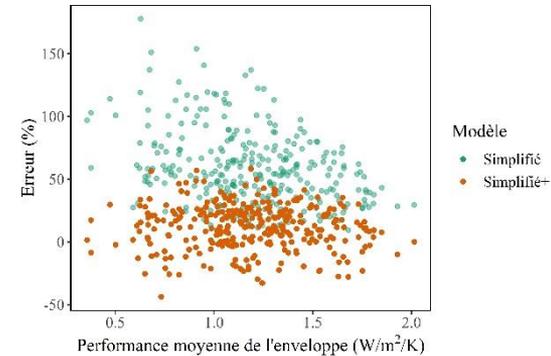
2-B. Modéliser le besoin de chauffage -- Modèle simplifié

Performances du modèle simplifié (Comparaison avec DIMOSIM)



$$R^2 = 0,637$$
$$NRMSE = 0,96$$

$$R^2 = 0,902$$
$$NRMSE = 0,50$$



Raffinement du modèle simplifié :

1. Considération d'une température de sous-sol pour les pertes par le plancher

$$T_{sol}(d, t) = \bar{T} - \Delta\bar{T} e^{d\sqrt{\frac{\pi}{\kappa\tau}}} \cos\left(\frac{2\pi t}{\kappa\tau} - \theta\right) \text{ (Kasuda and Achenbach, 1965)}$$

2. Calcul de l'irradiation sur les parois $J_p^b(t)$ (une fois via DIMOSIM) \rightarrow prise en compte des ombrages et orientations $\sum_{p \in P} IHU_p^b g_p^b$

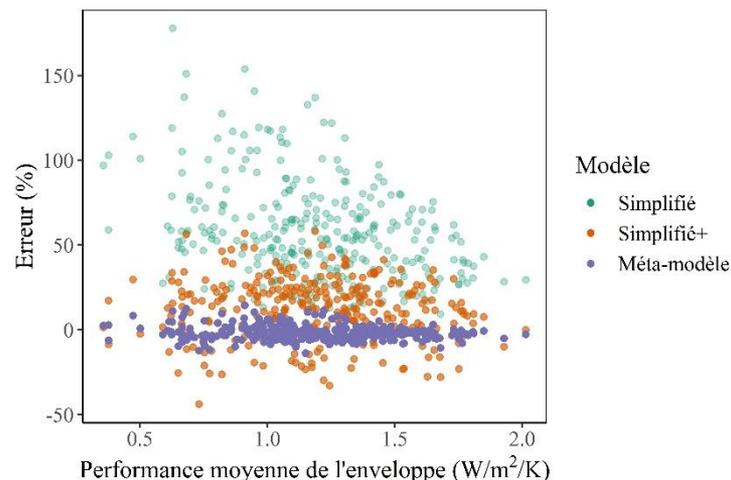
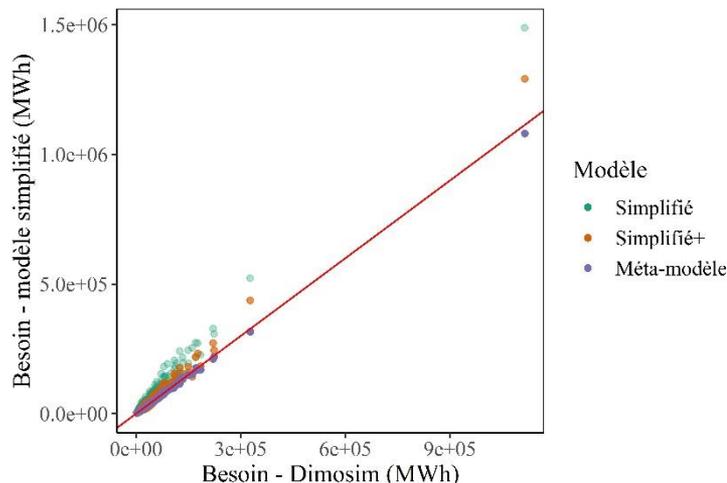
2-B. Modéliser le besoin de chauffage – Méta-modèle

Méta-modèle (*gray box*) basé sur le modèle simplifié et calibré sur la simulation

→ Intégrer des phénomènes plus complexes (e.g. inertie)

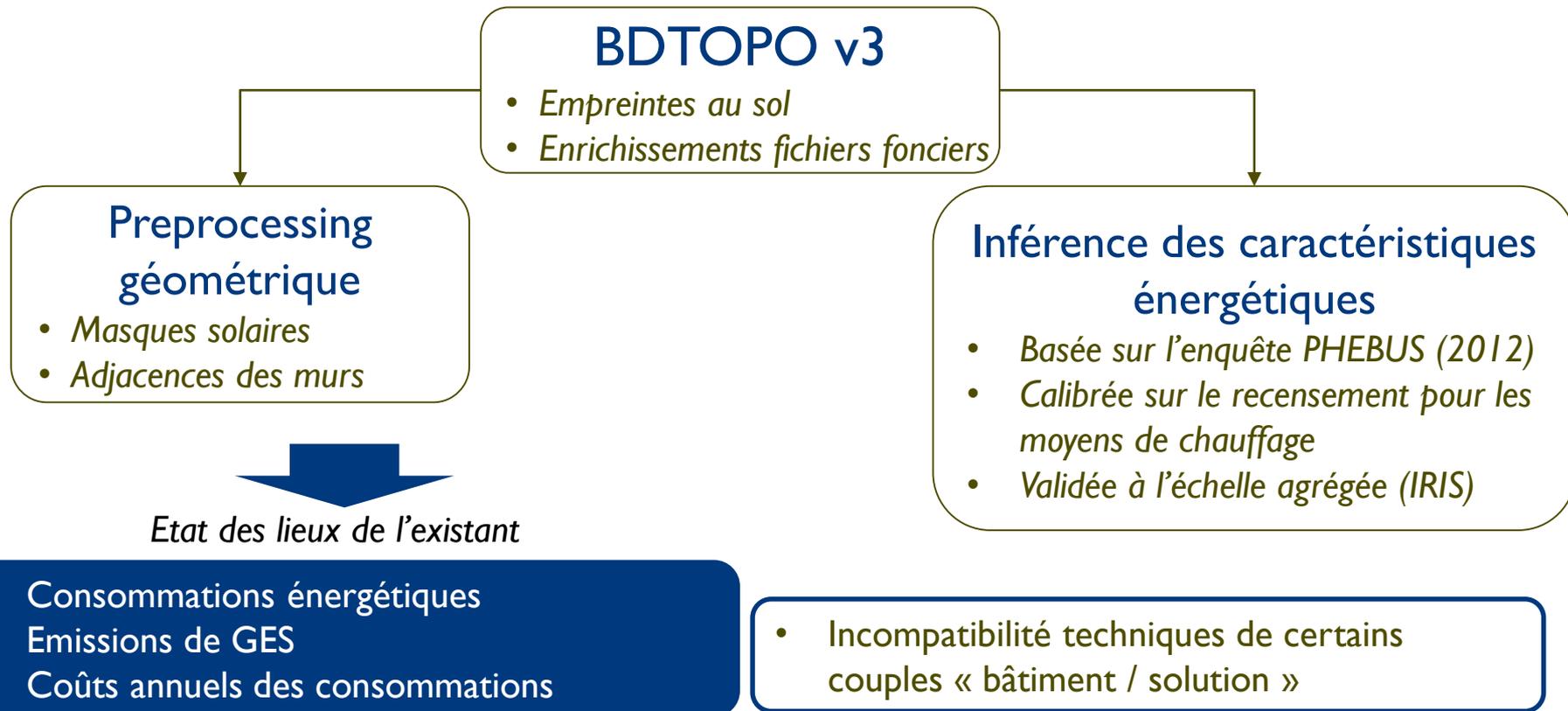
$$Q_{sim}^b \sim \sum_{p \in P} a_p DHU_p u_p^b A_p^b + a_{vent} DHU \frac{c_{air}}{3.6} \tau_{vent}^b V^b - \sum_{p \in P} b_p IHU_p^b g_p^b$$

a_{sol}	0,52
a_{toit}	0,80
a_{mur}	0,74
a_{vitres}	1,53
a_{vent}	0,63
b_{vitres}	-0,55



2-B. Modéliser le parc existant

Comment « nourrit-on » ce modèle de besoin ?



2-B. Modéliser le parc existant

- Données disponibles utilisées

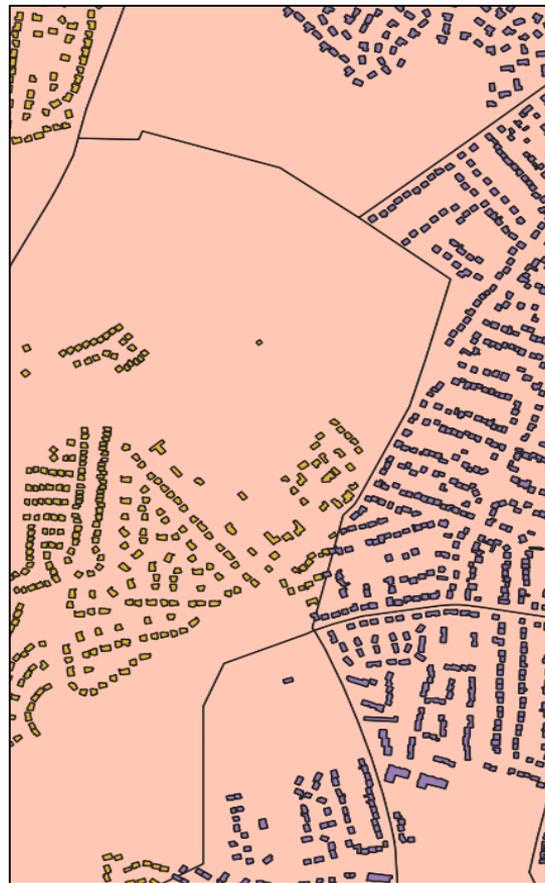
- Emprise au sol de bâtiments
- Hauteur
- Altitude

Données natives de l'IGN
(disponibilité : 100%)

- Usage des bâtiments
- Date de construction
- Nombre de niveau
- Nombre de logement
- Matériaux des murs
- Matériaux des toitures

Données inférées par l'IGN depuis les Fichiers Fonciers (MAJIC III)
(disponibilité : variable par département ; 75-96% pour la majorité ; certains IRIS "vides")

Mise en place de quelques « astuces » pour combler les données incomplètes



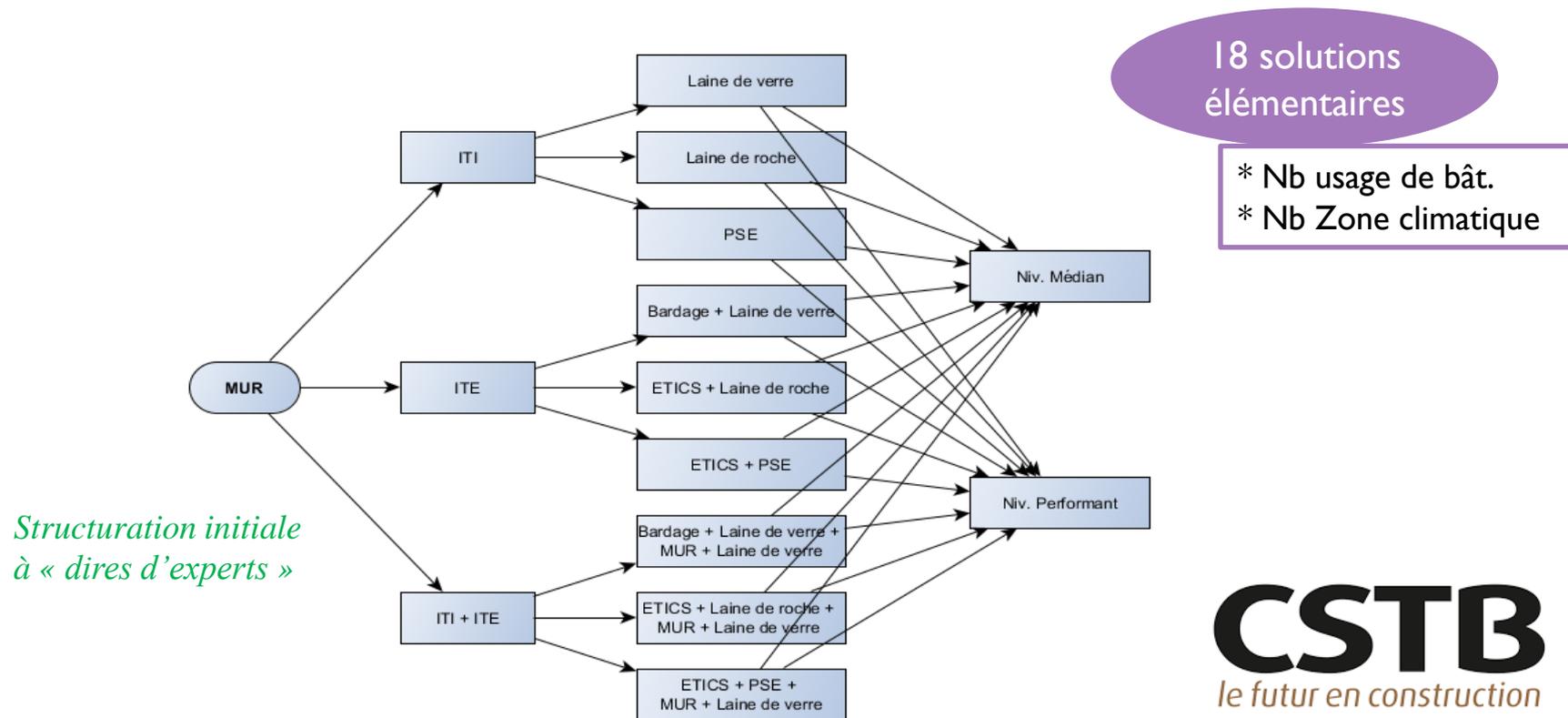
2-C. Modéliser la rénovation – Solutions de rénovation



- **Besoins & Constats**
 - Caractérisation d'une base de données « énergie + coûts » de solutions de rénovation
 - Pas de base de données détaillée sur la rénovation
- **Base OPE (RSET) + base de données CostOptimal**
 - 500 000 simulations RT2012 de bâtiments neufs
 - Toutes les données thermiques nécessaires
- **Base de données CostOptimal**
 - 50 solutions techniques de rénovation chiffrées

2-C. Modéliser la rénovation – Solutions de rénovation

- Workflow caractérisation énergétique (analyse OPE)
 - Arborescence métier de chaque « famille de solutions »



2-C. Modéliser la rénovation – Solutions de rénovation

- Workflow caractérisation énergétique (analyse OPE)
 - Arborescence métier de chaque « famille de solutions »
 - Analyse statistique sur 500 000 bâtiments

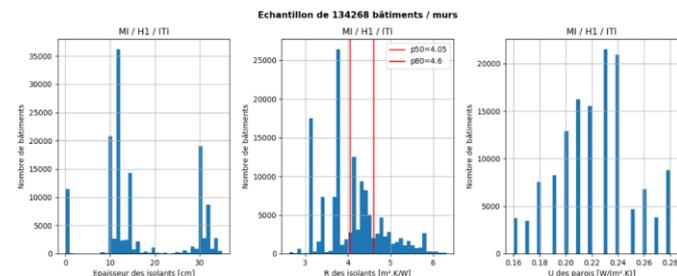
Usage	Zone climatique	Mode d'isolation	Technologie et nature d'isolant	U _{paroi} [W/(m ² .K)]	E _{isolant} [cm]	R _{isolant} [m ² .K/W]
Maison Individuelle (MI)	H1	ITI	Non disponible	Valeur moyenne disponible par bâtiment	Valeur moyenne disponible par bâtiment	Valeur moyenne disponible par bâtiment
Immeuble d'habitation collective (LC)	H2	ITE				
-	H3	ITI+ITE				

Critères de description du bâtiment ayant une influence sur les statistiques

Propriétés intrinsèques des solutions souhaitées ou disponibles



Un triplet de distributions pour chaque combinaison de caractéristiques discrètes



Une table de percentiles + taille d'échantillon pour chaque combinaison de caractéristiques discrètes

2-C. Modéliser la rénovation – Solutions de rénovation

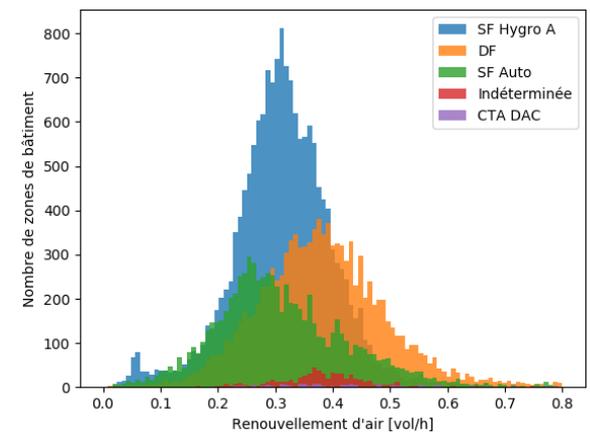
- Workflow caractérisation énergétique (analyse OPE)
 - Arborecence métier de chaque « famille de solutions »
 - Analyse statistique sur 500 000 bâtiments
 - Etablissement de niveaux de performance « réalistes » et « contextuels »

Configuration de bâtiments			Taille échantillon	Percentiles de Risques [m ² .K/W]										
Usage	Zone climatique	Mode d'isolation		p0	p10	p20	p30	p40	p50	p60	p70	p80	p90	p100
MI	H1	ITI	134 268	2.63	3.15	3.43	3.75	3.75	4.05	4.2	4.38	4.6	5.07	6.3
MI	H1	ITE	2 680	2	3.71	4.2	4.4	4.78	5	5.22	5.63	6.03	6.47	8.44
MI	H1	ITI+ITE	630	0	3.68	4.48	5	5.35	5.62	5.96	6.25	6.84	7.65	8.81
MI	H2	ITI	165 677	2.65	3.15	3.4	3.75	3.75	4.1	4.24	4.35	4.42	4.9	6.28
MI	H2	ITE	1 111	2.41	3.75	4	4.38	4.78	5.17	5.5	5.95	6.57	8.2	9.3
MI	H2	ITI+ITE	293	1.85	3.78	4.5	5.02	5.6	5.62	5.96	6.25	6.4	7.2	8.99
MI	H3	ITI	36 153	2.03	3.12	3.15	3.15	3.4	3.72	3.75	4.05	4.24	4.53	5.5
MI	H3	ITE	320	2	3.03	3.13	3.15	3.51	3.75	4.05	4.13	4.38	4.78	6.69
MI	H3	ITI+ITE	76	0	2.01	3.93	4.55	4.86	5.49	6.38	6.69	6.69	6.69	7.37
LC	H1	ITI	9 291	0	2.95	3.19	3.43	3.76	4.05	4.13	4.35	4.74	5.14	6.94
LC	H1	ITE	2 220	0	3.16	3.75	4.11	4.31	4.64	4.88	5.07	5.29	5.75	8.1
LC	H1	ITI+ITE	725	0	4.18	4.46	4.63	4.78	5.01	5.21	5.56	5.87	6.28	7.56
LC	H2	ITI	5 787	0	3.12	3.39	3.72	3.83	4.08	4.21	4.4	4.56	4.92	5.87
LC	H2	ITE	511	0.32	3.1	3.43	3.75	4	4.3	4.64	5	5.16	5.71	7.06
LC	H2	ITI+ITE	60	0	3.69	4.06	4.5	4.77	5.02	5.1	5.62	5.85	6.66	12.2
LC	H3	ITI	2 506	0	2.71	3.12	3.15	3.35	3.4	3.75	4	4.1	4.44	5.4
LC	H3	ITE	249	2.5	2.75	3.15	3.16	3.31	3.74	3.85	4.06	4.36	5	6
LC	H3	ITI+ITE	18	3.75	3.89	4.04	4.11	4.24	4.42	4.61	4.9	5.02	5.12	6.2

Niveau médian

Niveau Exigeant

Combinaisons de critères sous-représentés : garde-t-on ces configurations?



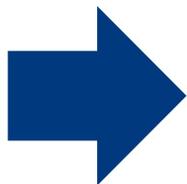
2-C. Modéliser la rénovation – Solutions de rénovation

- Workflow caractérisation énergétique (analyse OPE)
 1. Arborescence métier de chaque « famille de solutions »
 2. Analyse statistique sur 500 000 bâtiments
 3. Etablissement de niveaux de performance « réalistes » et « contextuels »
 4. Construction d'une base de solutions statistiquement représentative

Catégories	Solutions	Filt. #1	Filt. #2	...	Carac. #1	Carac. #2	...	Utilisatio n
MUR	ITI + ITE / Bardage + Laine de verre + MUR + Laine de verre / P	MI	H3	...	120EUR/ m ²	320 mm	...	Réno
FENETRE	PVC / DV / Volets roulants / M	LC	H1	...	150€/U	1,2 W/m ² .K	...	Réno
CHAUFFAGE	Chaud. Stand. Fioul / Radia. HT	MI	H1	...	-	n=77%	...	Existant
...
PV	Monocristallin	LC	-	...	400€/m ²	120Wc/m ²	...	Existant / Réno

2-C. Modéliser la rénovation – Solutions de rénovation

- Workflow caractérisation énergétique (analyse OPE)
 1. Arborescence métier de chaque « famille de solutions »
 2. Analyse statistique sur 500 000 bâtiments
 3. Etablissement de niveaux de performance « réalistes » et « contextuels »
 4. Construction d'une base de solutions statistiquement représentative
- Workflow caractérisation économique (analyse CostOptimal + Edibatec + divers)
 - Recherche des coûts d'investissement les plus probables pour chaque solution
 - Croisement avec des bases de données fabriquant « Scrapping »
 - Synthèse « à dires d'expert »



Connexion automatique de la BDD à l'optimiseur du modèle de simulation SHAPE

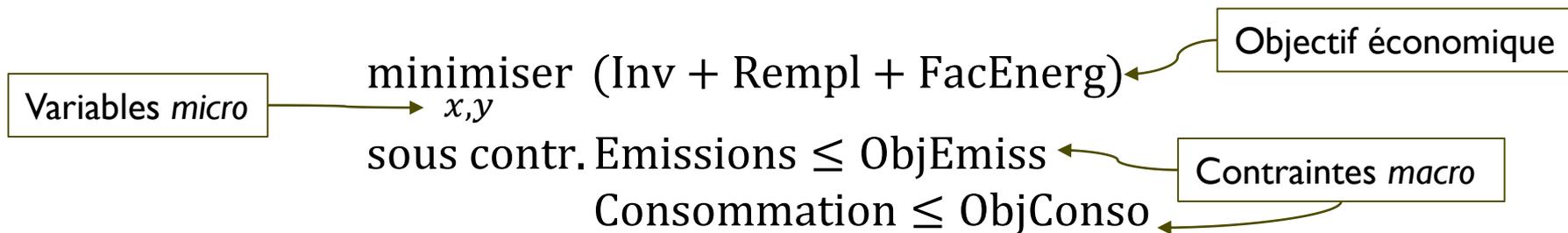
2-D. Optimisation: construction du problème

Variables de décision binaires (activation d'une solution)

- x pour la rénovation thermique (par paroi) \rightarrow impact sur les u
- y pour le remplacement des systèmes \rightarrow impact sur le η et combustible

Forme du problème

	À optimiser	Contraint par
Territoire	Investissements (minimiser)	Indicateurs
Propriétaires	Bénéfices (maximiser)	Indicateurs
Omniscient	Indicateurs (multi-objective)	Investissements



2-D. Optimisation: adaptation pour utilisation territoriale

Non-linéarités évidentes:

$$E = \frac{1}{\eta}(y) \times B(x)$$

- Techniques de linéarisation – couplage des variables

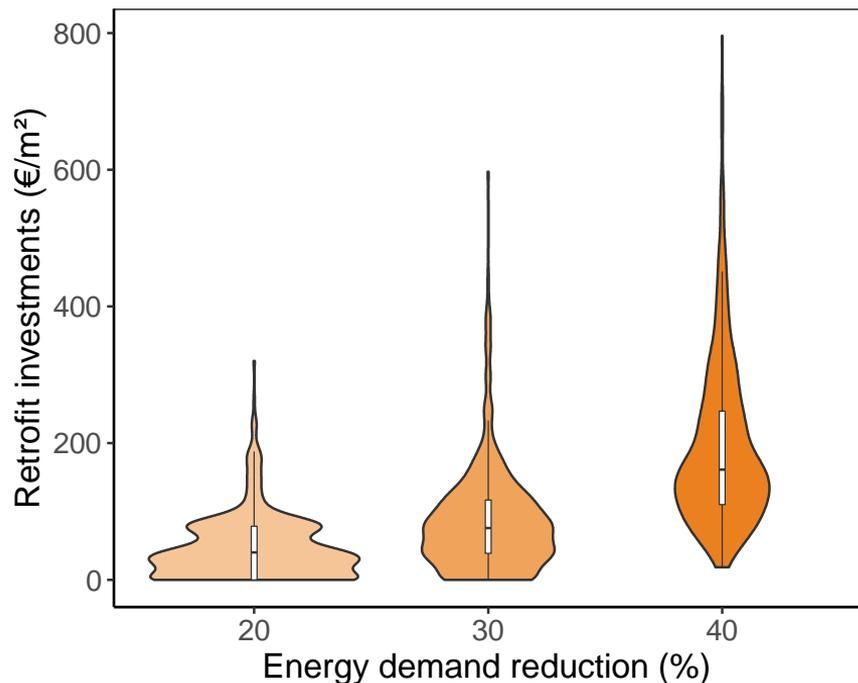
Couplages supplémentaires

- Dimensionnement des systèmes ajusté avec la rénovation
- Besoin de remplacer les émetteurs si pas assez puissants
- Installation d'une ventilation si une rénovation est menée
- Puissance mini-maxi des systèmes

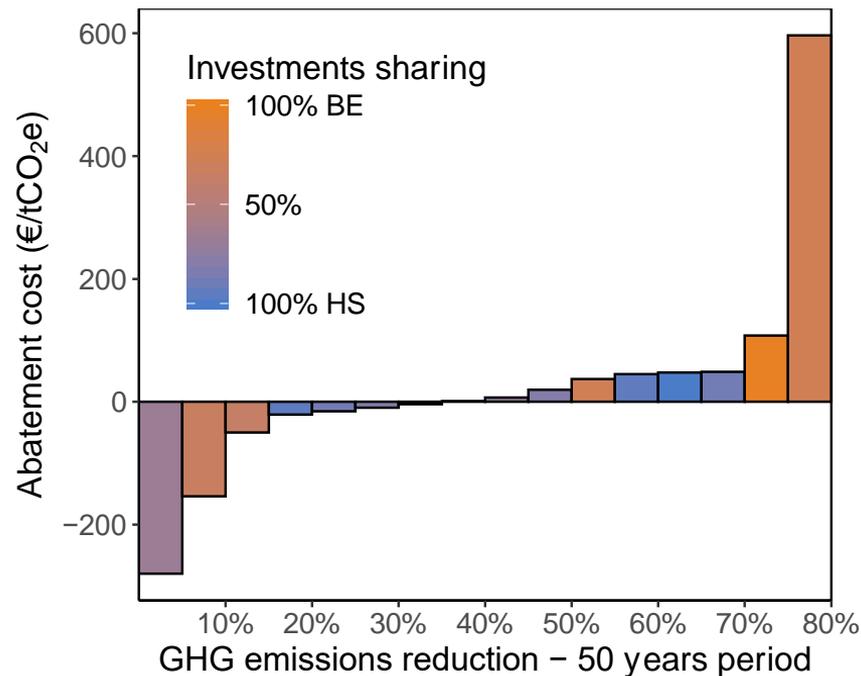
→ Adaptation permanente pour la compatibilité avec l'optimisation territoriale

2-D. Optimisation – Exemples de résultats

Impact des objectifs *macro* sur les coûts de rénovation

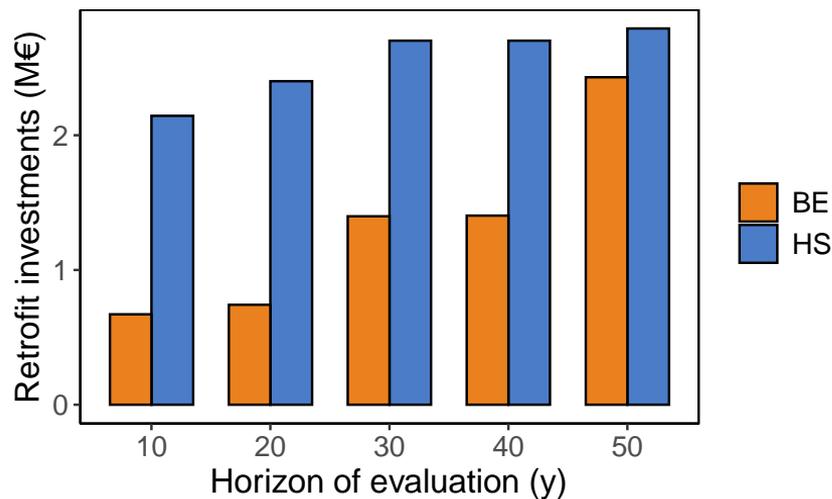


Tracé d'indicateurs propres à un territoire d'étude



2-D. Optimisation – Exemples de résultats

Évolution des investissements selon l'horizon d'évaluation



Identification des bâtiments à fort potentiel d'économie



2-D. Optimisation - Implémentation de la Méthode

Vers une suite d'outils OpenSource

- **Recodage de la méthode d'optimisation**

Langage R
RStudio
AMPL modeling language
Solver IBM CPLEX



Langage Python
Pyomo modeling language
MIP Solver CBC (Coin-or branch and Cut)



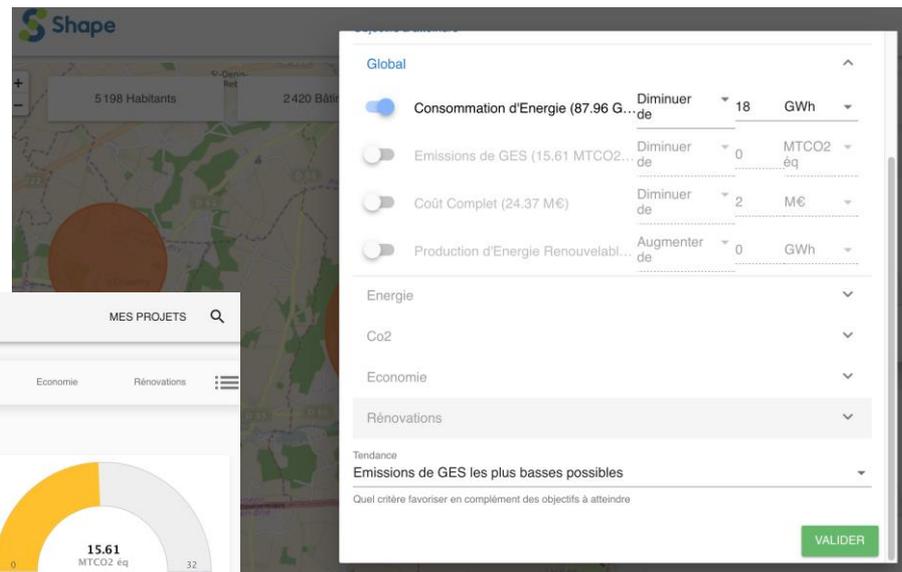
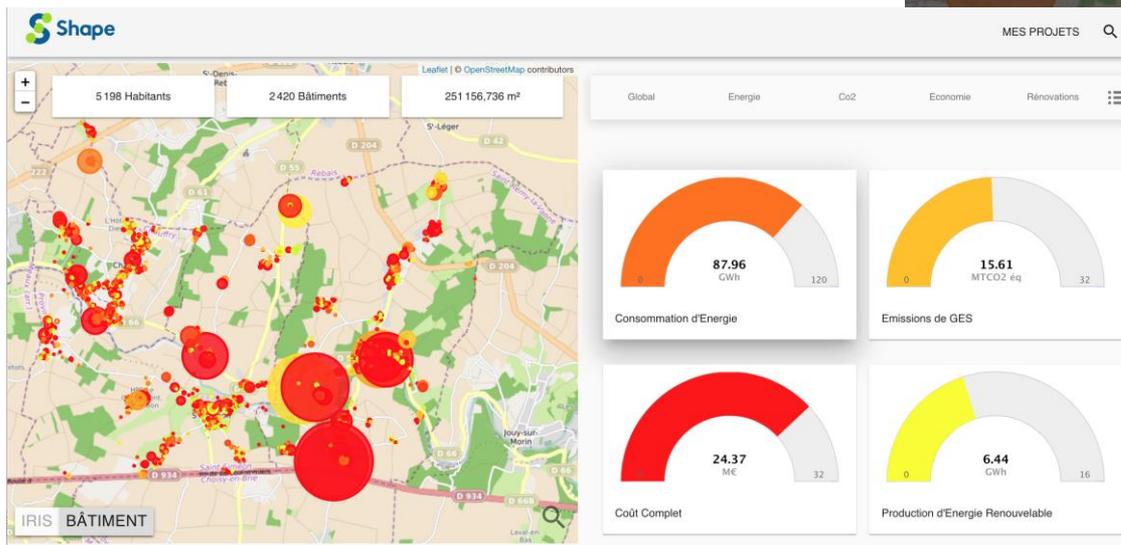
- **Choix du langage utilisé**
 - Simplifier le déploiement en web service
 - Rendre accessible le code: solver open source

2-D. Optimisation -- Interface web de l'optimiseur

Plusieurs fonctions objectif

Lien avec la BD TOPO V3

Présentation des résultats



Merci de votre attention, des questions ?
antoine.rogeau@mines-paristech.fr
robin.girard@mines-paristech.fr



ANNEXES

I-B. Modéliser le bâti- Enrichissement avec Phebus

- Récupération des données PHEBUS
 - Partage des données Quiriel
 - Extraction / Fusion des données « Bâtiment » (et non « logement »)
- Données-clés
 - Environ 1700 bâtiments pondérés (représentatifs du parc)
 - Données DPE (issues d'un échange technique de 50 minutes / bâtiment)
 - Caractérisation thermique suffisante pour le modèle thermique (état initial)
- Génération de statistiques-clés
 - Analyse fine des U-values et leur contexte (année de construction, géométrie...)
 - Génération d'un catalogue de technologies récurrentes (chauffage, ECS)
- Objectifs
 - Inférer des données thermiques dans la BD Topo v3
 - Aide à la création de la base de solutions de rénovation

Données météorologiques



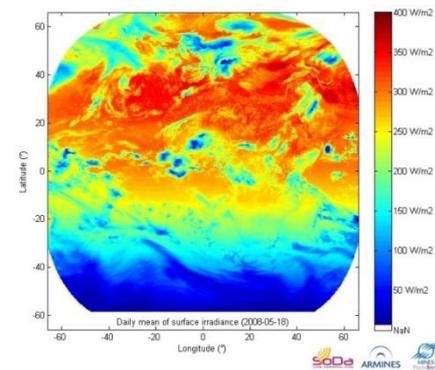
- Images satellite
- Stations météorologique

Mesures

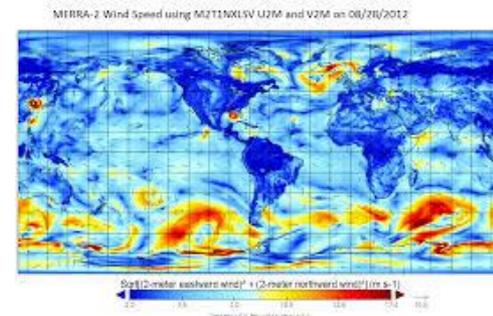
- Ré-analyses
- Prédiction court terme

Combinaison modèles/mesures

- Stations météorologiques très utilisées par les énergéticiens
- ERA5 (ECMWF): résolution horaire/couverture planétaire/10km de résolution
- SODA : irradiation au sol (image sat+modèle transfert radiatif), 15 minutes 15 km.



SoDa database providing irradiation data



Exemple of wind map produced by reanalysis (MERRA database from NASA)

Description des foyers et commerces



- Recensement
- MAJIC
- Etude logement
- Emploi du temps
- SIRENE
- TOPO
- ...



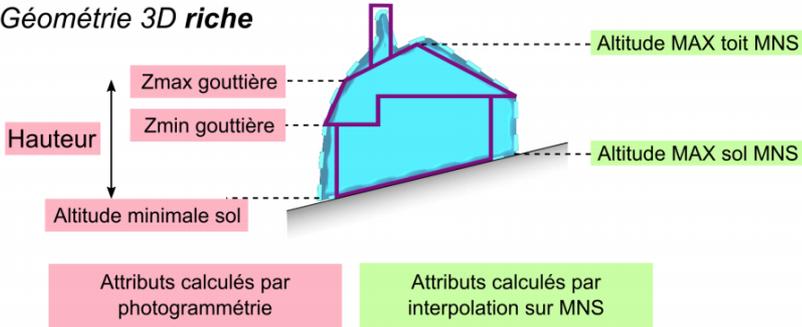
*Exemple de découpage
de ville à la maille IRIS*

BD TOPO V3 – MNS et autres bases

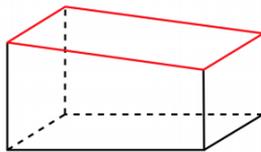


- TOPO
- BD Parcellaire
- Adresse (BAN)
- MAJIC (impots) – matching en cours

Géométrie 3D riche

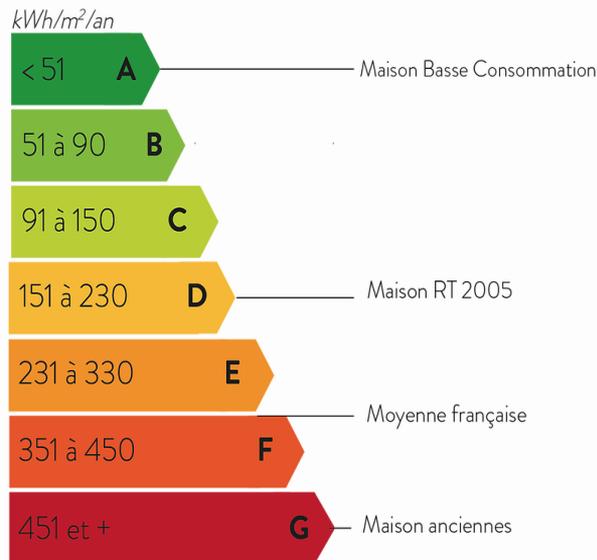


Modélisation géométrique



(exemple simple)

Dorémi -- Sortir les Français de la précarité énergétique



- Rénovation « pas à pas » inefficace, savoir où l'on va et y aller directement.
- Accompagnement du financement et de la maîtrise d'ouvrage
- Focus sur maison individuelle d'avant la première RT (<1973)

I-D. Optimisation – notations pour la rénovation

Une rénovation r définie par :

- Sa paroi d'application p
- Son coefficient thermique $u_{p,r}$
- Son facteur solaire $g_{p,r}$
- Son coût CS_r (€/m²)

Rénover = un choix \rightarrow Variable binaire $x_{p,r}^b$

$$\sum_{r \in R_p} x_{p,r}^b = 1, \forall b, p$$

- Effet sur le besoin énergétique

$$u_p^b(X_p^b) = \sum_{r \in R_p} x_{p,r}^b u_{p,r}^b$$

- Modélisation des coûts

$$I_{p,r}^{RTb}(X_p^b) = \sum_{r \in R_p} x_{p,r}^b CS_r A_p^b$$

Addition	Remplacement
$\frac{1}{u_{p,r}^b} = \frac{1}{u_p^{0,b}} + \frac{1}{u_{p,r}}$	$u_{p,r}^b = u_{p,r}$

I-D. Optimisation – Remplacement des systèmes –

Impact sur la consommation énergétique → Modèle physique

$$E^b = \frac{1}{\eta^b} Q^b$$

L'installation d'un système s défini par :

- Un coût d'installation CF_s (€/u)
- Un coût d'équipement CV_s (€/kW)
- Un rendement annuel η_s
- Un coût d'émetteurs CE_s (€/kW)

• Effet sur la consommation énergétique

$$\frac{1}{\eta^b} (Y^b) = \sum_{s \in S} y_s^b \frac{1}{\eta_s^b}$$

$$\sum_{s \in S} y_s^b = 1, \forall b$$

• Modélisation des coûts

$$I^{RS^b}(Y^b) = \sum_{s \in S} y_s^b (CF_s + (CV_s + \alpha CE_s) Q_{dim}^b)$$

I-D. Optimisation – fonction de coût

Plusieurs points de vue peuvent être adoptés :

	À optimiser	Contraint par
Territoire	Investissements (minimiser)	Indicateurs
Propriétaires	Bénéfices (maximiser)	Indicateurs
Omniscient	Indicateurs (multi-objective)	Investissements

La formulation de base du problème à résoudre :

$$\underset{X,Y}{\text{minimiser}} \quad \text{Inv}(X, Y) = \sum_b \text{Inv}^b(X^b, Y^b)$$

$$\text{Sous contraintes } \text{Indic}_i(X, Y) = \sum_b \text{Indic}_i^b(X^b, Y^b) \leq \text{Indic}_i^{\text{Target}}, \forall i$$

$$\sum_{r \in R_p} x_{p,r}^b = 1, \forall b, p$$

$$\sum_{s \in S} y_s^b = 1, \forall b$$

$$x_{p,r}^b, y_s^b \in \{0,1\}, \forall b, p, r, s$$

I-D. Optimisation – Couplage des variables

Non linéarités dans les fonctions objectif et/ou contraintes

$$E(X, Y) = \sum_b \frac{1}{\eta^b(Y^b)} Q^b(X^b)$$

Structure additive sur b, s, p et r

$$= \left(\sum_b \right) \left(\sum_s \right) y_s^b \frac{1}{\eta_s^b} \left(\sum_{p,r} \right) x_{p,r}^b (DHU u_{p,r}^b + IHU g_{p,r}^b \delta_p^b) A_p^b + \frac{C_{air}}{3.6} \tau_{vent}^b V^b$$

L'optimisation 0-1 devient NP-difficile → Linéarisation du problème
(Hochbaum, 2007)

La non-linéarité peut être absorbée en couplant les indices

- Du plus agrégé... $z_k \in \{0,1\}, \forall k \in (B \times S \times R_1 \times \dots \times R_4)$ ❌ (Très grand nombre de variables)
- En passant par... $z_k^b \in \{0,1\}, \forall b \in B, k \in (S \times R_1 \times \dots \times R_4)$
- Au moins agrégé $z_{p,k}^b \in \{0,1\}, \forall b \in B, p \in P, k \in (S \times R_p)$ ✅ (Nombre de variables limité)

I-D. Optimisation – nouvelle formulation : Knapsack problem

Couplage rénovation thermique – changement de système énergétique

$$z_{p,k}^b \in \{0,1\}, \forall b \in B, p \in P, k \in (S \times R_p)$$

→ Variante Knapsack problem⁴

(Garey, 1979)

minimiser $\sum_{b,p,k} z_{p,k}^b O_{p,k}^b$
 X, Y

Sous contraintes $\sum_{b,p,k} z_{p,k}^b f_{p,k}^{i,b} \leq F^i \quad \forall i$

(Unicité des solutions installées) $\sum_k z_{p,k}^b = 1, \forall b, p$

(Même s pour chaque p) $\sum_{k=(s,1)}^{(s,|R_p|)} z_{p_1,k}^b = \sum_{k=(s,1)}^{(s,|R_p|)} z_{p_2,k}^b, \forall b, s, p_1, p_2$

$$z_{p,k}^b \in \{0,1\}, \forall b \in B, p \in P, k \in (S \times R_p)$$

⁴A. Rogeau, R. Girard, Y. Abdelouadoud, M. Thorel, G. Kariniotakis. Joint Optimization of Building-envelope and Heating-system Retrofits at Territory Scale to Enhance Decision-aiding. *Applied Energy*. Under review