



# **Modélisation de la Demande d'Énergie pour la Climatisation**

Estimation et Prédiction par un Modèle Ascendant

Florian Dittmann, Philippe Rivière

CES Mines ParisTech, PSL

3 octobre 2019 - Université de Genève

# Impact de la clim

- Electricité
  - Nécessaire pour faire fonctionner le compresseur
  - Généré à partir de ressources fossiles → émissions
  - Faible rendement de la génération et de la transmission/distribution
- Croissance observé dans les dernières décennies attendue à continuer
  - Augmentation du pouvoir d'achat dans les pays chauds
  - Augmentation des températures dans les pays à haut pouvoir d'achat
- Grand potentiel d'amélioration du rendement saisonnier
- Régulation efficace pour augmenter le rendement moyen
- Joli rapport <https://www.iea.org/futureofcooling/>
- Manque de données pour l'Europe
- Coût pour l'économie vs impact sur la réduction des émissions  
→ Estimation de la demande d'énergie essentiel

## 1. ESTIMATION de la demande pour une année

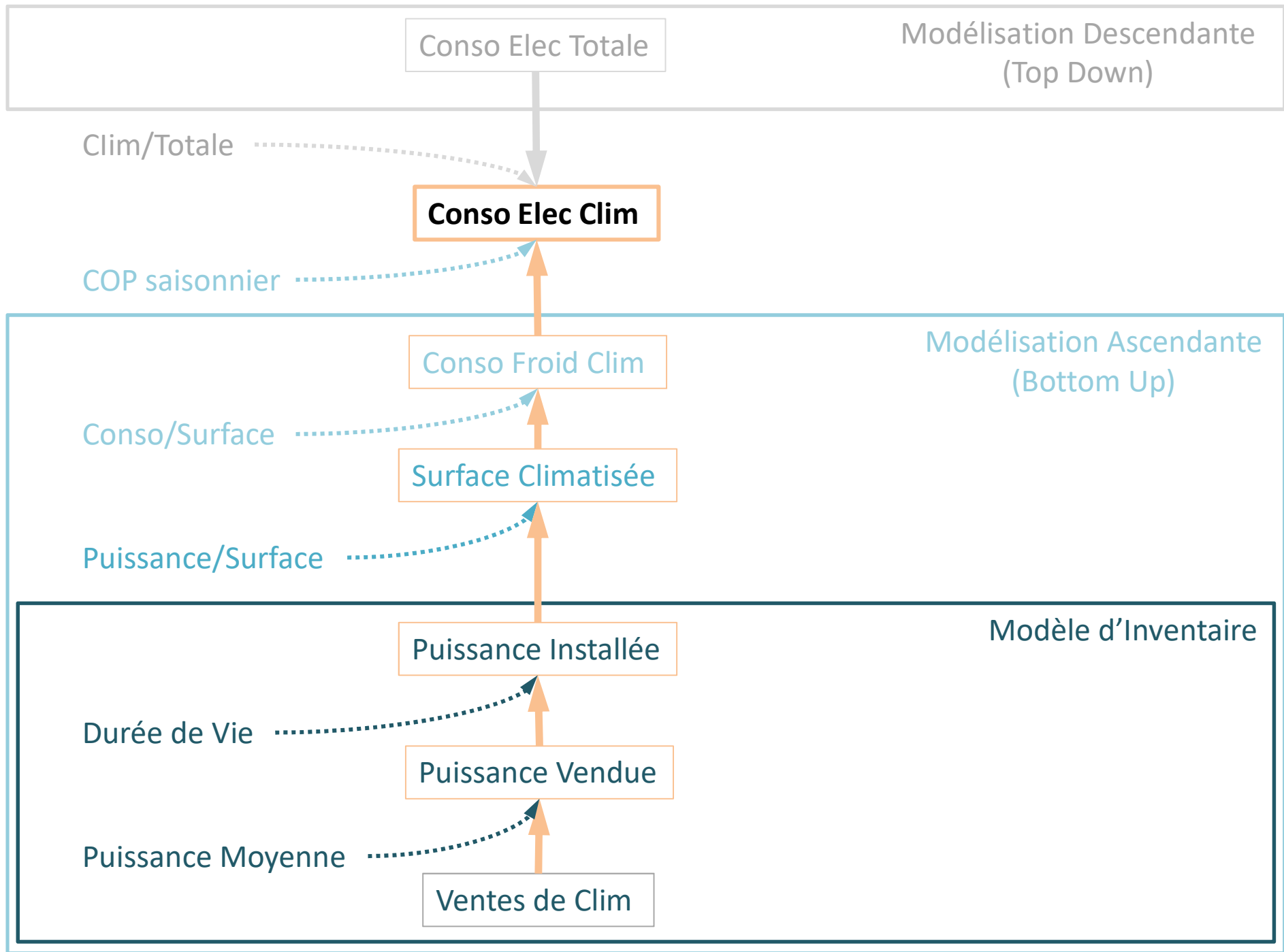
- Ventes  $\rightarrow$  Inventaire (puissance)
- Puissance par surface =  $f(\text{climat}) \rightarrow$  Surface climatisée
- Consommation par surface =  $f(\text{climat}) \rightarrow$  Consommation de froid
- COP saisonnier  $\rightarrow$  Consommation d'électricité

## 2. PROJECTION de l'estimation dans l'avenir

- Ventes =  $f(t)$ 
  - Extrapolation de la croissance
  - Saturation du marché =  $f(\text{climat}, \text{pouvoir d'achat})$
  - Croissance du marché =  $f(t)$ $\rightarrow$  fonction logistique
- Sous-modèles
  - Climat =  $f(t)$
  - Pouvoir d'achat =  $f(t)$
- COP saisonnier =  $f(t)$

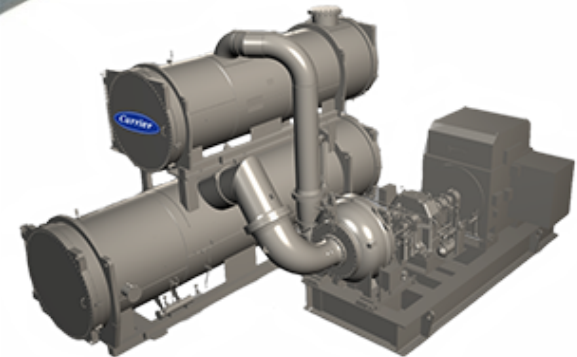
# 1. ESTIMATION de la demande pour une année





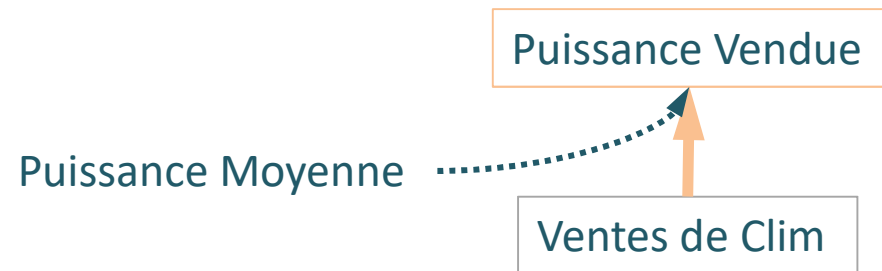
# Ventes par Produit

- Mobile
- Split (petit < 5kW < grand)
- VRF (variable réfrigérant rate)
- Chillers air/eau (petit < 400kW < grand)
- Chillers eau/eau (petit < 400kW < grand)



# Puissance Vendue

- Puissance Vendue :  $P_{\text{ven}} = P_{\text{moy}} * N_{\text{ven}}$
- Données
  - Ventes de Climatiseurs :  $N_{\text{ven}}$
  - Puissance moyenne :  $P_{\text{moy}}$
  - Répartition en résidentiel et tertiaire



- Sources données : BSRIA + Eurovent surtout
- Sources d'incertitude
  - Interpolations (ventes et répartitions)
  - Différentes catégories des sources
  - Différentes méthodologies (souvent inconnues) des sources
  - Puissances moyennes calculées sur un petit échantillon ou parfois juste  $(\text{max} + \text{min}) / 2$
  - Cycle économique

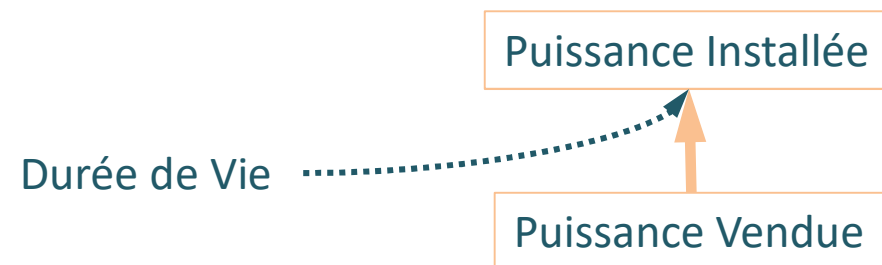
UNITS FRANCE	1992	1993	1994	1995	...	2012	2013	2014	2015	POWER (kW)
Movables + Window Units	54 681	55 018	53 757	79 402		70900	97700	59600	147900	3
Small Split (<5 kW)	44 218	44 490	43 471	60 257		160 810	191 862	190 244	191 960	4
Big Split (>5 kW, incl. ducted)	39 373	39 616	38 708	49 155		173 719	162 381	164 725	165 736	8
VRF	344	347	339	398	...	14 272	14 882	15 640	16 061	25
Rooftop + Packaged	11 573	11 644	11 377	11 588		6 697	7 091	8 394	7 755	65
Chillers (A/W) < 400 kW	3 129	2 103	1 853	2 828		6 200	5 530	5 224	6 834	70
Chillers (A/W) > 400 kW	340	214	181	149		568	644	689	653	604
Chillers (W/W) < 400 kW	805	441	333	359		1 997	1 743	1 956	1 610	145
Chillers (W/W) > 400 kW	281	161	127	109		322	347	340	343	702

# Puissance Installée

- Puissance installée :  $(P_{inv})_n = \sum_{j=n-L}^{n-1} (P_{ven})_j$
- Durée de vie moyenne : L

FRANCE POWER	L (years)
Movables + Window Units	10
Small Split (<5 kW)	12
Big Split (>5 kW, incl. ducted)	12
VRF	15
Rooftop + Packaged	15
Chillers (A/W) < 400 kW	15
Chillers (A/W) > 400 kW	20
Chillers (W/W) < 400 kW	15
Chillers (W/W) > 400 kW	20

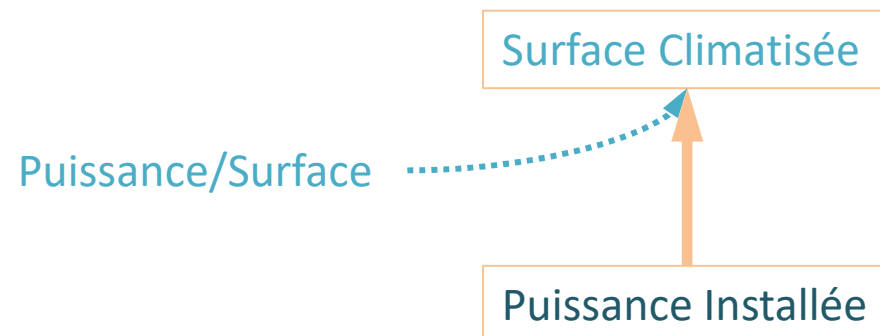
2012	2013	2014	2015	2016	2017	2018	...
60	62	61	66	67	68	69	
2 864	3 006	3 138	3 193	3 236	3 281	3 330	
11 286	11 678	12 023	12 299	12 482	12 559	12 536	
3 057	3 369	3 678	3 987	4 241	4 519	4 829	...
7 016	6 818	6 808	6 773	6 838	6 968	7 114	
4 538	4 605	4 664	4 801	5 094	5 409	5 762	
4 457	4 686	4 956	5 224	5 502	5 822	6 134	
1 835	1 912	1 988	2 046	2 155	2 307	2 463	
2 818	2 933	3 065	3 209	3 374	3 553	3 739	
<b>37 932</b>	<b>39 069</b>	<b>40 381</b>	<b>41 598</b>	<b>42 989</b>	<b>44 486</b>	<b>45 976</b>	...





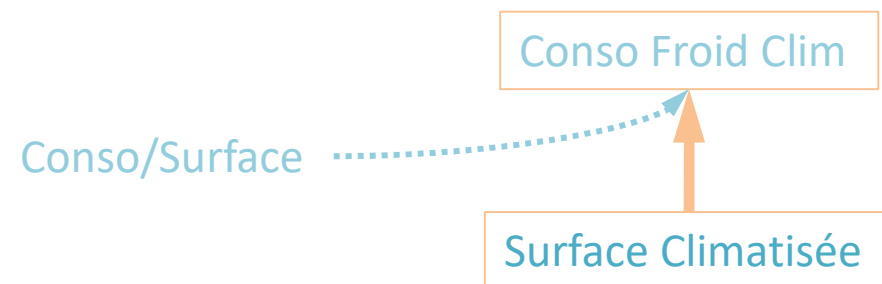
# Surface Climatisée

- $S_{cli} = P_{inv} / (P_{inv} / S_c)_{moy}$
- Modèle pour  $(P_{inv} / S_{cli})_{moy}$ 
  - Puissance moyenne par surface :  $(P_{inv} / S_{cli})_{moy} = f(\text{climat})$ 
    - Modélisation thermique des bâtiments, parc de bâtiments
    - Données locales (sondage installateurs)
    - Surdimensionnement très courant
    - Résidentiel : 80 – 180 W/m<sup>2</sup>
    - Tertiaire : 160 – 300 W/m<sup>2</sup>
- $S_{cli} / S_{tot}$  : Mesure de la pénétration du marché



# Consommation de Froid

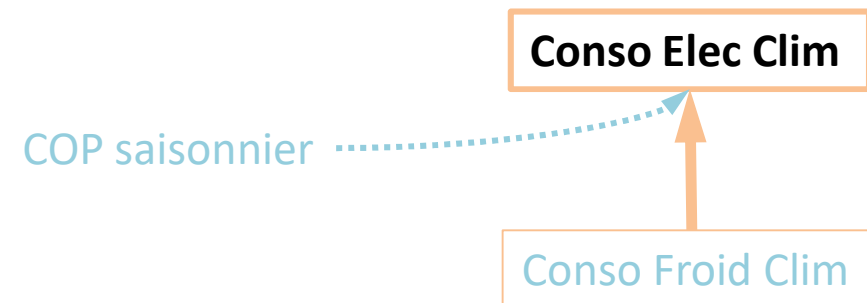
- $E_{\text{fro}} = S_{\text{cli}} * (E_{\text{fro}}/S_{\text{cli}})_{\text{moy}}$
- Modèle pour  $(E_{\text{fro}}/S_{\text{cli}})_{\text{moy}}$ 
  - Consommation moyenne par surface :  $(E_{\text{fro}}/S_{\text{cli}})_{\text{moy}} = f(\text{climat})$ 
    - Modélisation thermique du bâtiment, parc de bâtiments
    - Résidentiel : 6 – 70 kWh/m<sup>2</sup>
    - Tertiaire : 40 – 230 kWh/m<sup>2</sup>
- $E_{\text{fro}}$  : chaleur échangée à l'évaporateur



# Consommation d'Electricité

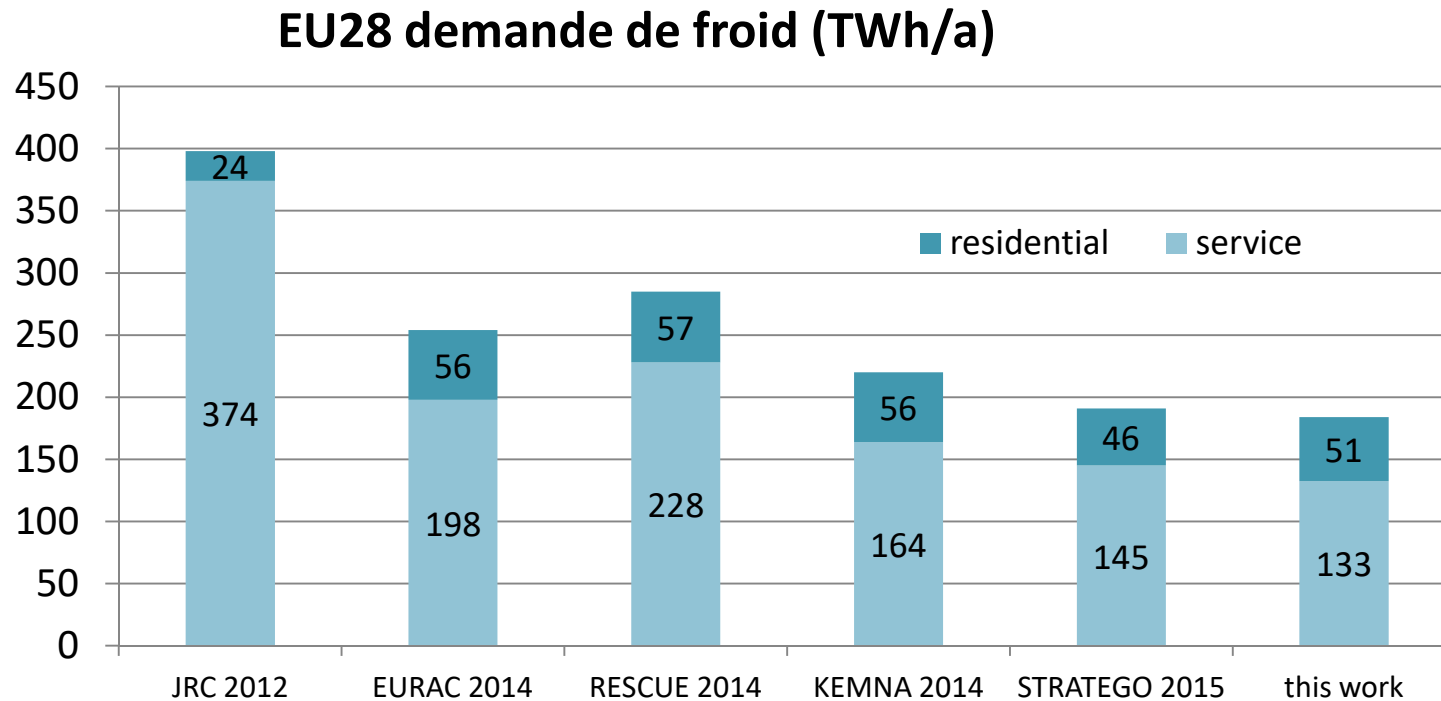
- $E_{\text{ele}} = E_{\text{fro}} / \text{COP}$
- COP (saisonnier) par gamme de produits vendus
  - Eurovent
  - Régulation et standards nationaux et UE (SEER)
  - Informations des fabricants
  - Surdimensionnement à prendre en compte

AVG SEER (OF UNITS SOLD)	2019
movable (EER)	2.76
split<5kW	6.53
split>5kW	6.09
VRF	5.09
Rooftop + Packaged	5.09
Chiller air <400kW	4.13
Chiller air >400kW	4.48
Chiller water <400kW	5.43
Chiller water >400kW	6.38



# Exemple de Résultat

- Estimations de la demande de climatisation en 2015

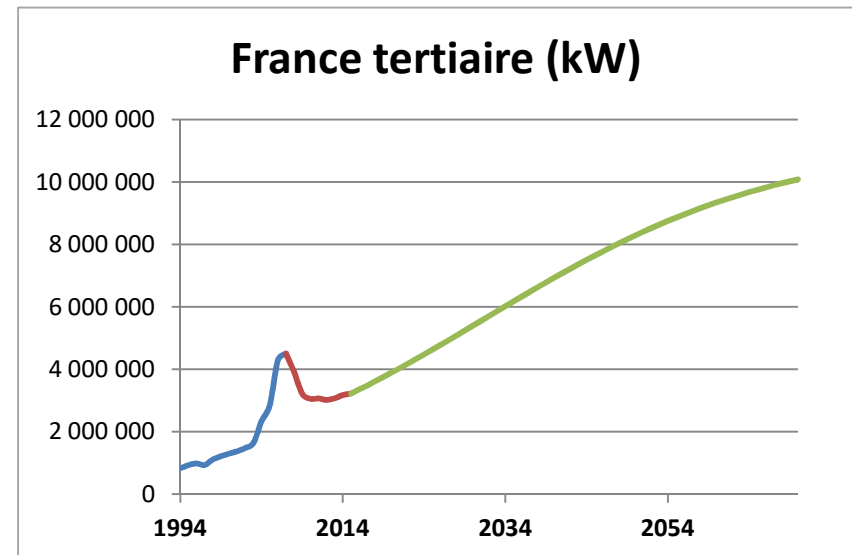
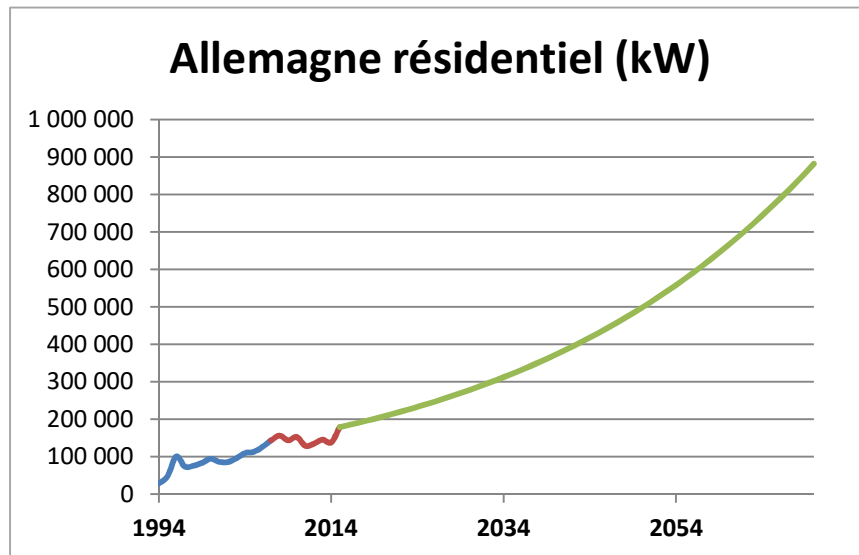


## 2. PROJECTION de la demande dans l'avenir



# Projection des Ventes

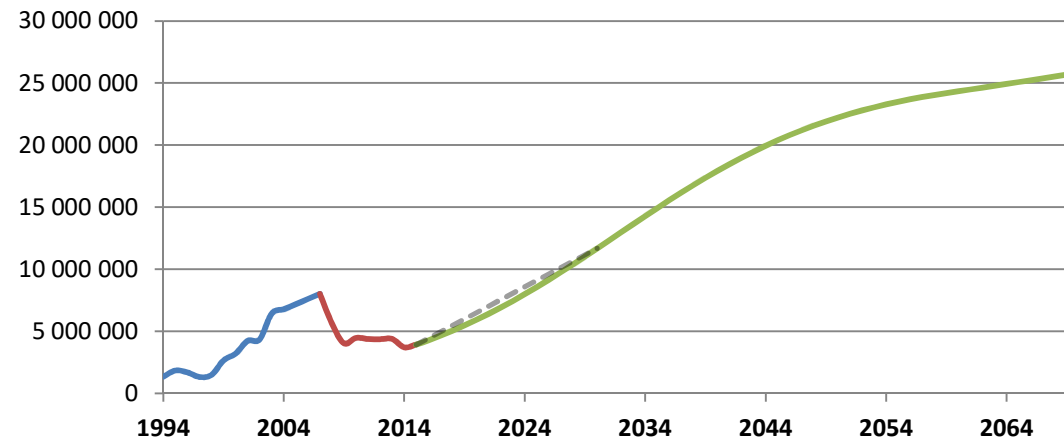
- Fonction logistique
  - $P_{\text{ven}} = P_{\text{ven}}^{\text{sat}} / [ 1 + \exp( - k * (n - n_M) ) ]$
  - Puissance vendue sur un marché saturée :  $P_{\text{ven}}^{\text{sat}}$
  - Point d'inflexion :  $n_M$
  - Mesure du gradient autour de  $n_M$  :  $k$



# Projection des Ventes

- Fonction logistique
  - $P_{\text{ven}} = P_{\text{ven}}^{\text{sat}} / [ 1 + \exp( - k * (n - n_M) ) ]$
  - Puissance vendue sur un marché saturée :  $P_{\text{ven}}^{\text{sat}}$
  - Point d'inflexion :  $n_M$
  - Mesure du gradient autour de  $n_M$  :  $k$
- Calcul des paramètres
  - Puissance vendue année 0
  - Puissance vendue année  $0 + x$  (extrapolation linéaire de la croissance des ventes)
  - Saturation du marché (inventaire → calibration itérative)

# Projection des Ventes

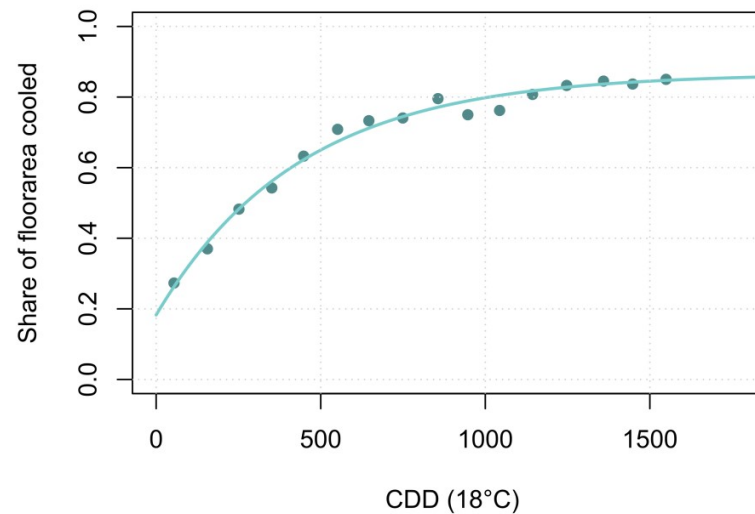


- Calcul des paramètres
  - Puissance vendue année 0
  - Puissance vendue année  $0 + x$  (extrapolation linéaire de la croissance des ventes)
  - Saturation du marché (inventaire  $\rightarrow$  calibration itérative)



# Saturation et Croissance du Marché

- Modèle de saturation
  - Tertiaire :  $(S_{cli}/S) = f(\text{climat})$ 
    - $(S_{cli}/S) = 1 - \exp(a_T * CDD)$
  - Résidentiel :  $(S_c/S) = f(\text{climat}, \text{pouvoir d'achat})$ 
    - $(S_{cli}/S) = [1 - \exp(a_R * CDD)] / [1 + b * \exp(c * GNI/\text{foyer})]$
  - Basée sur les données du EIA des USA et McNeil et al. (2011)
- Croissance de la surface habitable/commerciale à taux constant :  $S_n = S_0 * (1+r)^n$



# Sous-Modèles Prédictives

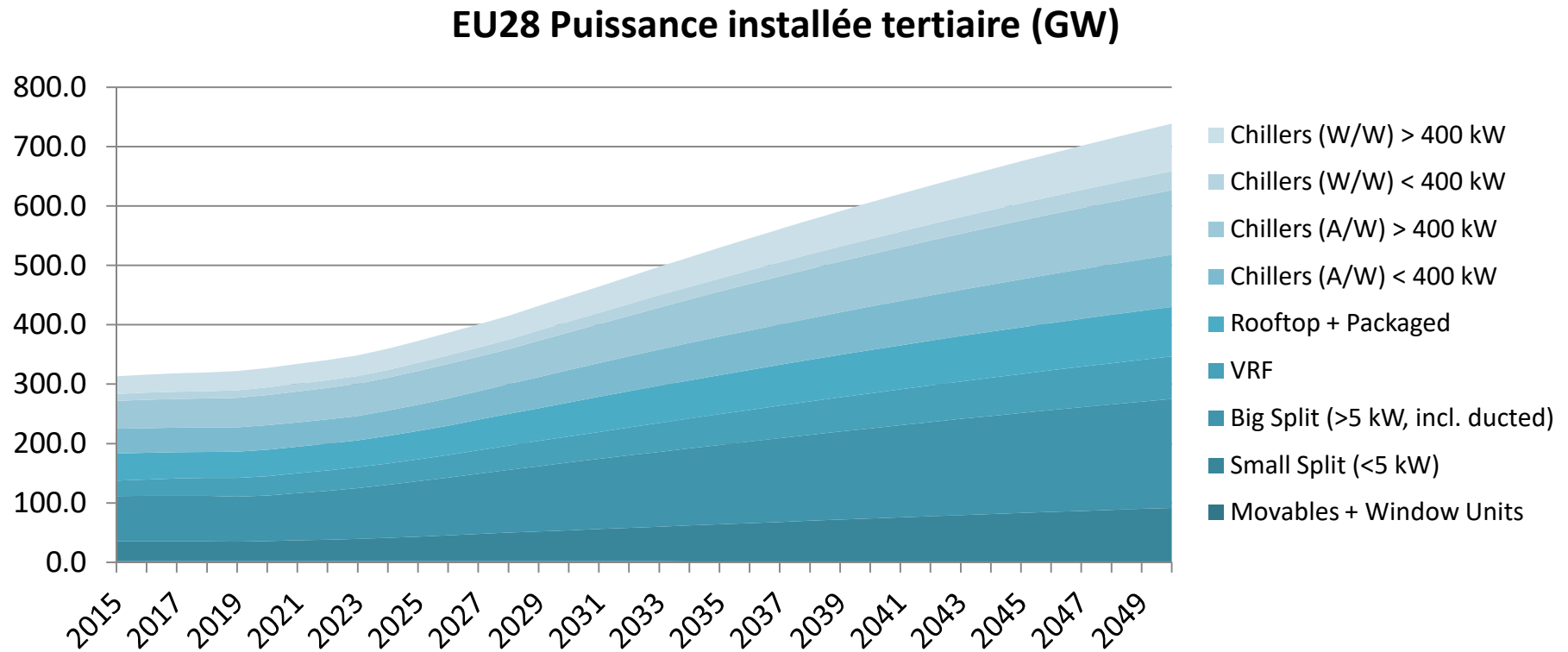
- Réchauffement Climatique :  $CDD = f(t)$ 
  - CDD : « Cooling Degree Days »
    - $CDD = \sum_{j=1}^M [\max(0, ((T_{\max})_j + (T_{\min})_j) / 2) - T_{ref}]$
    - Typiquement  $M = 365$  (un an)
  - Données ASHRAE moyennées sur un territoire
  - Prédiction basée sur les scénarios du GIEC
- Croissance du pouvoir d'achat :  $GNI = f(t)$ 
  - GNI : « Gross National Income »
  - GNI vs GNI PPP
    - mieux : GNI / prix par unité de puissance
  - Extrapolation linéaire

$$\text{COP} = f(t)$$

- Extrapolation de la régulation UE
- Appliqué aux unités vendues
- Amélioration des petites unités sur le marché
  - Performance en charge partielle
    - Echangeurs surdimensionnés
    - Variateur de fréquence
  - Petits Split individuel vs grands Chillers centralisés
    - Hier :  $\text{COP}_{\text{Split}} < \text{COP}_{\text{Chiller}}$
    - Aujourd'hui :  $\text{COP}_{\text{Split}} \approx \text{COP}_{\text{Chiller}}$
    - Demain :  $\text{COP}_{\text{Split}} > \text{COP}_{\text{Chiller}}$

# Exemple de résultat

- Prédiction de l'inventaire par gamme de produit

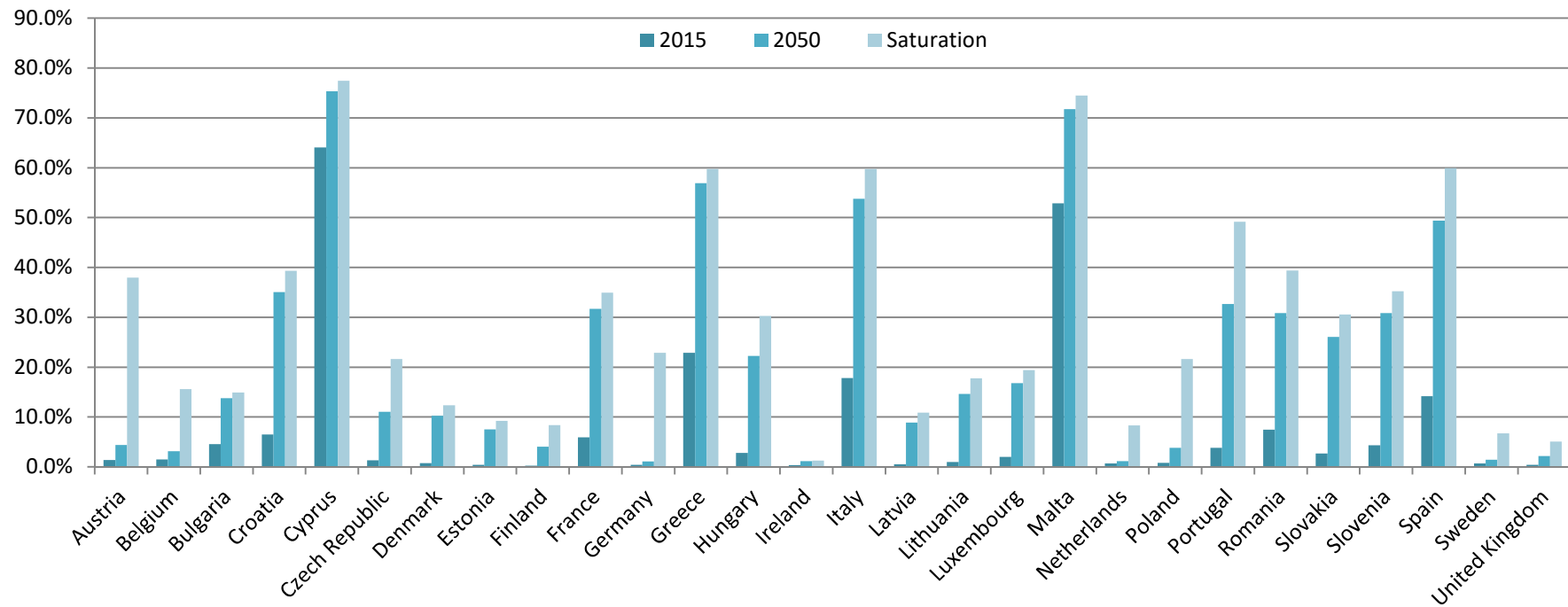




# Exemple de résultat

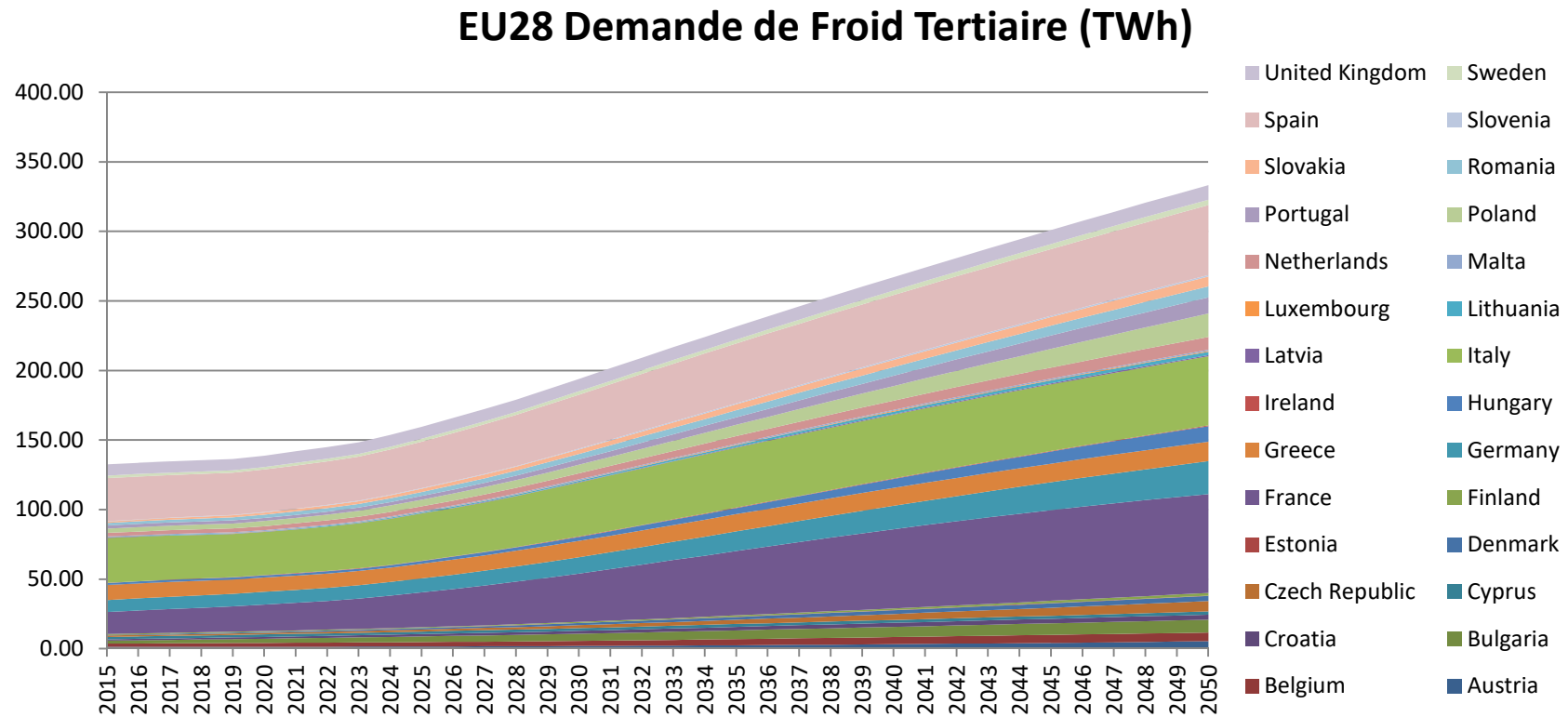
- Pénétration du marché (%surface climatisée)

%surface climatisée EU28 résidentiel



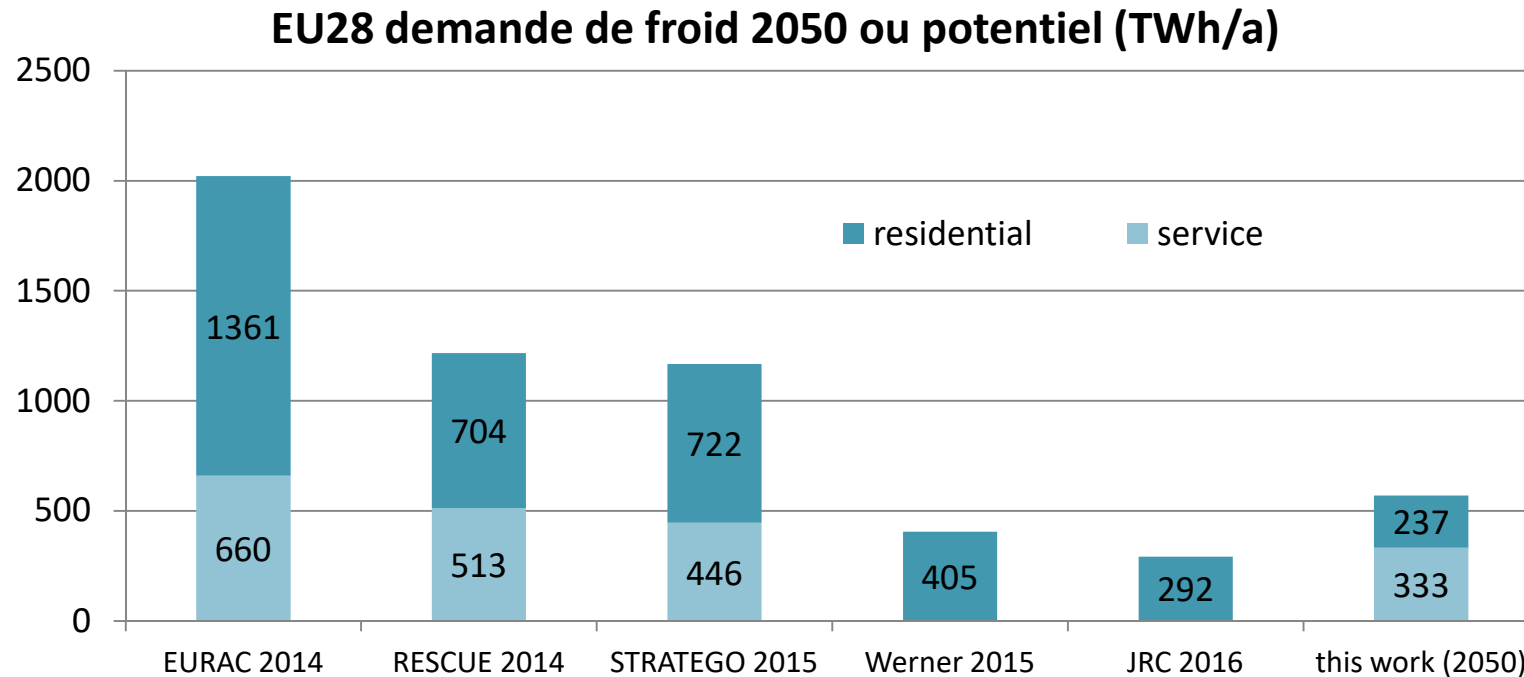
# Exemple de résultat

- Prédiction de la demande par pays par secteur



# Exemple de résultat

- Prédications de la demande de climatisation en 2050





# Réduction d'Incertitudes

- Qualité des données
  - Obligation de déclaration de ventes
  - Sondages/recensement sur l'énergie (EIA aux USA)
  - Etudes sur l'impact de régulation et standardisation
- Couplage entre sous-modèles
  - $(P_{inv}/S_{cli})_{moy} - (E_{fro}/S_{cli})_{moy} - COP$  saisonnier
- USA vraiment un bon modèle pour UE ?
  - OUI
    - Changement climatique et canicules
    - Diminution du prix des climatiseurs
  - NON
    - Difficultés d'installation dans les villes européennes
    - Utilisation moins intense que aux USA
  - Vidéo marrante Le Monde :  
<https://www.youtube.com/watch?v=M5f6sdRqOI0>