



la transition énergétique du Danemark un modèle démocratique de planification

Thierry de Laroche Lambert

Professeur associé à l'Institut Femto-ST
CNRS-UMR6174, Département Énergie
Chaire Supérieure de Physique-Chimie
Docteur en Énergétique
courriel : thierry.de-laroche Lambert@femto-st.fr

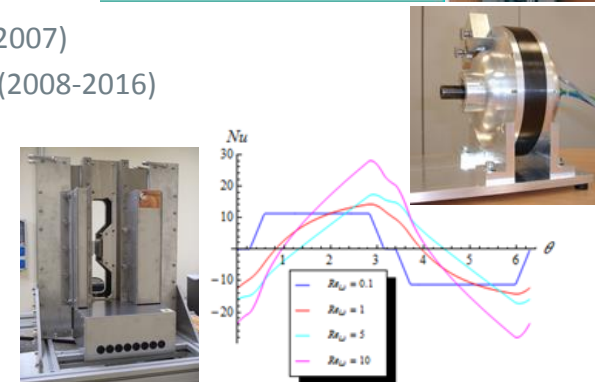
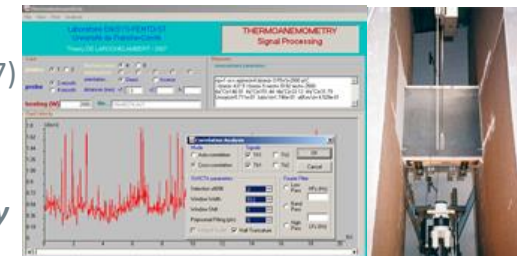
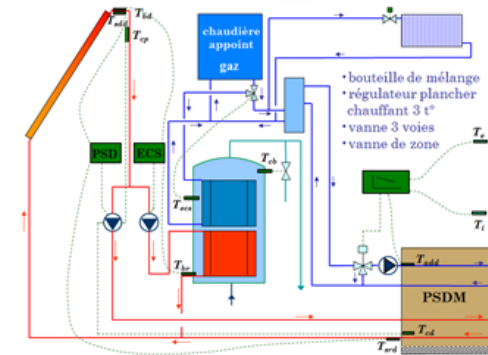


1. introduction
2. la structure énergétique du Danemark
3. la planification démocratique du Danemark
4. vers le Smart Energy System danois
5. conclusions

présentation

- ❑ Agregate Professor Physics and Chemistry (1987)
- ❑ PhD Energetics (High-Alsace University)- december 1997: "*Experimental and Theoretical Assessment Of Natural Convection Conjugate Heat Transfer Through Strongly Heated Vertical Double-Walls*" (*Etude expérimentale et théorique des transferts thermiques couplés en convection naturelle à travers une double paroi verticale à haute densité de flux de chaleur*)
- ❑ High-Chair Professor Physics and Chemistry (since 1999)
- ❑ Associate Professor & researcher at FEMTO-ST Institute (since 2007), *Energy Department*
- ❑ Associate Professor at CNAM-Alsace (since 2016)

- ❑ Cofonder of the « **Alter Alsace Energies** » Association for the development of renewable energy and energy efficiency (1980)
- ❑ Geothermal heating project for Lutterbach city (1980-1986)
- ❑ Assessment of **regional 100% renewable energy scenarios** (Projet Alter Alsace – 1983)
- ❑ Researches on "*natural convection conjugate heat transfer through single and double walls*" in the Risks and Environment Management Laboratory (**Laboratoire Gestion des Risques et Environnement**) - High Alsace University - France (1989-1997)
- ❑ Design, optimization, realization, measurement, physical modelling of the so-called "Mixed Direct Solar Heating Floor" (**Plancher Solaire Direct Mixte**) – 1990-2005
- ❑ Researches on "*turbulent structures in natural convective boundary-layers during transition to turbulence along strongly heated vertical walls*" (1997-2007)
- ❑ Development of the **SWICTA measurement method** (*Sliding Window Cross-correlation Thermo-Anemometry*) (1997-2007)
- ❑ Researches on the **magnetocaloric effect and development of Active Magnetic Regenerator Refrigeration systems** (2008-2016)
- ❑ *Modelling of the critical phenomena, critical exponents, state equation during ferromagnetic transition in gadolinium*
- ❑ Development of an extended SWICTA method (2007-2009)
- ❑ **Mathematical assessment of heat and momentum transfer in alternating incompressible flows** (2014-16)
- ❑ **Energy policy analysis and transition towards a 100% renewable system assessment** (1983-2016)
- ❑ Chief of the « Magnetocaloric devices » Pole in the FEMTO-ST Institute



présentation

Institut FEMTO-ST

Institut FEMTO-ST (Franche-Comté Electronique Mécanique Thermique et Optique – Sciences et Technologies)

► *unité mixte de recherche* UMR 6174 née le 1er janvier 2004 (fusion de cinq laboratoires francs-comtois)

▪ quadruple tutelle: [Université de Franche-Comté](#) (UFC), [Centre National de la Recherche Scientifique](#) (CNRS), [École Nationale Supérieure de Mécanique et des Microtechniques](#) (ENSM), [Université de Technologie Belfort-Montbéliard](#) (UTBM)

► 7 départements scientifiques:

→ **AS2M** (Automatique et Systèmes Micro Mécatroniques)

→ **ÉNERGIE** (machines thermodynamiques, électriques, métrologie des écoulements et transferts)

→ **MÉCANIQUE APPLIQUÉE**

→ **MN2S** (Micro Nano Sciences et Systèmes)

→ **OPTIQUE**

→ **TF** (Temps-Fréquence)

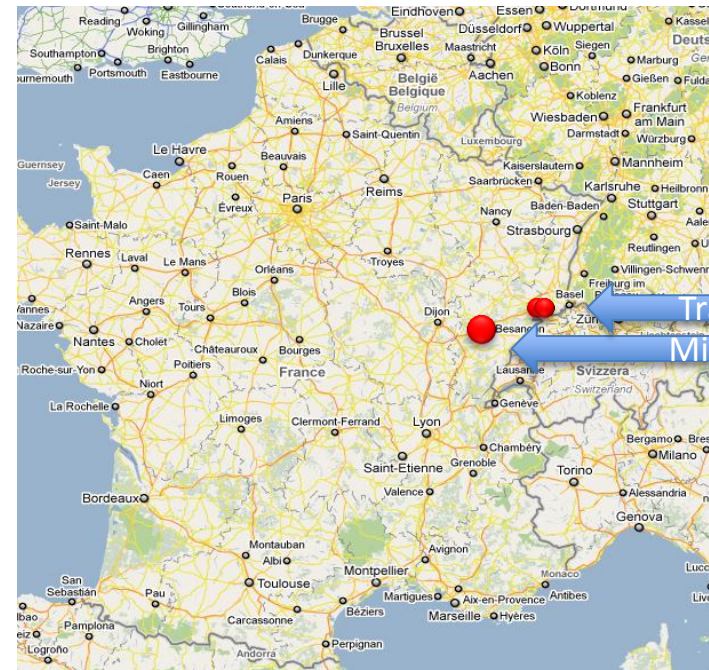
→ **DISC** : Département d'Informatique des Systèmes Complexes

• *plus de 700 membres*

Permanents: 35 Chercheurs CNRS , 195 Prof.,
90 Ing. + Tech. + Adm.

Doctorants: 220

Non permanents:: 160



Transportation, Energy
Microtechnics

1. introduction



1.1. les outils énergétiques dans l'économie

- unités d'énergie et de puissance

préfixes:

k (kilo) $\equiv 10^3$
M (méga) $\equiv 10^6$
G (giga) $\equiv 10^9$
T (téra) $\equiv 10^{12}$
P (péta) $\equiv 10^{15}$
E (exa) $\equiv 10^{18}$

énergie :

1 J $\equiv 1$ N m
1 kWh $\equiv 3,6$ MJ
1 TWh $\equiv 3,6$ PJ
1 TJ $\equiv 0,278$ GWh
1 PJ $\equiv 0,278$ TWh
1 tep $\equiv 11625$ kWh
1 TWh $\equiv 0,0860$ Mtep

puissance :

1 W $\equiv 1$ J s⁻¹

- comptabilités énergétiques internationales

EP : énergie primaire (consommée, produite) \equiv énergie initiale consommée ou produite tenant compte du contenu énergétique des produits consommés

GEC (*gross energy consumption*): énergie brute consommée \equiv énergie primaire consommée ajustée des imports-exports électriques convertis avec le mix électrique national

EF : énergie finale \equiv énergie réellement consommée sous forme de *chaleur*, de *travail* (déplacements, fabrications, usinages, ..), *électricité spécifique* (éclairage, électronique,..)

consommations ajustées \equiv consommations observées corrigées des variations saisonnières en recalculant mensuellement et annuellement les déperditions des bâtiments et des systèmes de chauffage à partir des degrés-jours comparés de la séquence moyenne des températures extérieures sur 10 ou 20 ans

IE : intensité énergétique \equiv énergie primaire consommée/PIB

- éléments d'analyses énergétiques

LCOE (*levelized cost of energy*): coût actualisé de l'énergie calculé à partir des

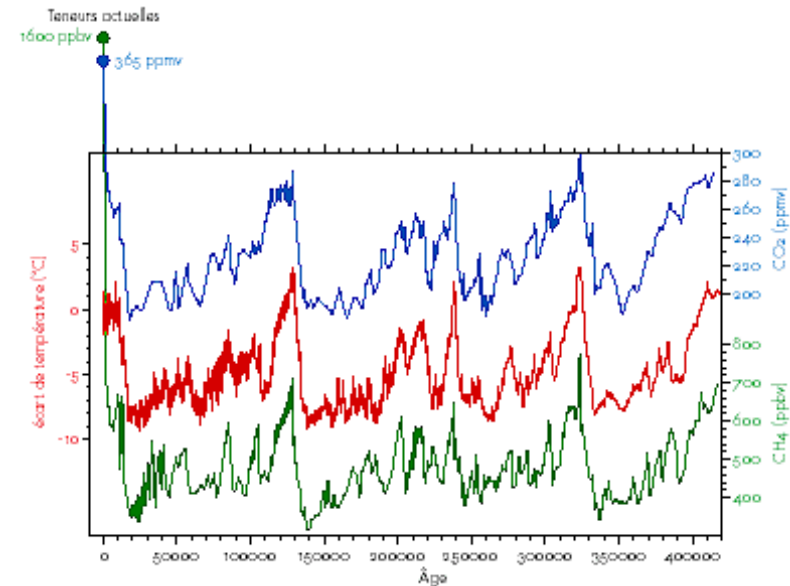
- investissements annualisés (taux d'actualisation 5,25%)
- coûts annuels de maintenance
- coûts éventuels de fonctionnement
- quantités annuelles d'énergie produite
- coûts éventuels de raccordement (selon le pays)

1. introduction

1.2. transitions énergétiques: le contexte international

- **changement climatique accéléré**
- **surconsommation des ressources de la biosphère** (crédit août→décembre)
- désertification, ressources en eau, pollutions chimiques et biologiques
- réserves fossiles finies mais encore élevées: répartition inégale, tensions géopolitiques, émissions GES, gaz de schiste et bulles financières, baisse de la demande
 - ▶ *baisse des prix favorable aux investissements EnR, efficacité et sobriété énergétiques*
 - ▼ *subventions publiques mondiales aux énergies fossiles >> aides aux EnR*
- **raréfaction des métaux** ▶ *nécessité du recyclage et de la sobriété*
- **catastrophes nucléaires** (TMI 1979, Tchernobyl 1986, Fukushima 2011, ...)
- **coûts, incertitudes nucléaires** (sécurité, déchets, démantèlement, catastrophes)
- prolifération nucléaire militaire (Pakistan, Inde, Israël, Corée du Nord, etc.)
- dépendance énergétique européenne élevée (pétrole, gaz, uranium)
- insuffisance des objectifs européens 2020 (-20% de consommation d'énergie; -20% d'émissions de GES; 20% ENR par rapport à 1990) et mondiaux
- **développement rapide des ENR dans le monde** ▶ **stabilisation des émissions CO₂ 2014**

- ▶ situation intenable, politique BAU insoutenable
- ▶ nécessité *absolue* d'une planification énergétique urgente: objectifs 2030-2050
- ▶ choix déterminants en réponse aux contraintes climatiques, énergétiques, géopolitiques et environnementales: COP 21 ratifiée → et après ?



- 452 G€/an ≡ aides financières des gouvernements du G20 aux énergies fossiles
- 4850 G\$/an ≡ exonérations + subventions mondiales directes aux énergies fossiles (FMI mai 2015)
- 270 G\$/an ≡ aides mondiales aux énergies renouvelables (AIE 2015)

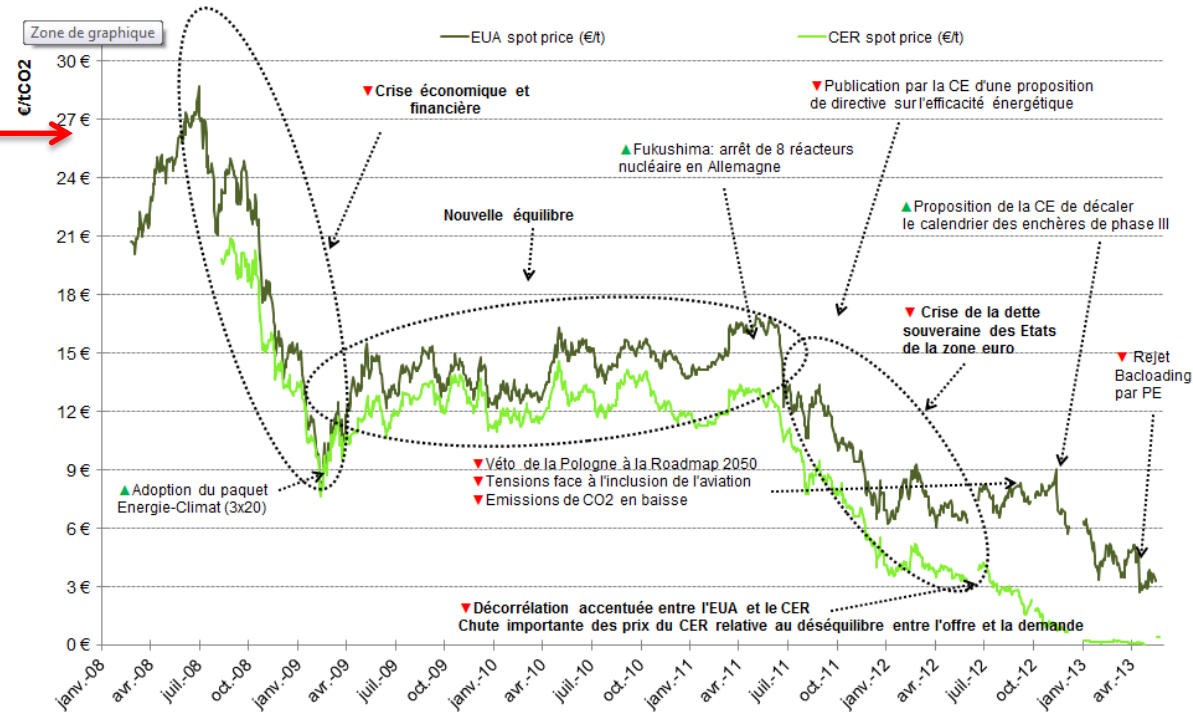
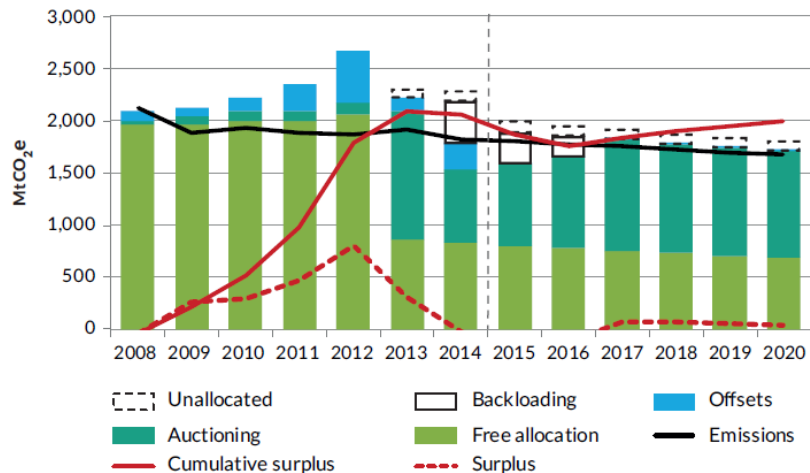


1. introduction

1.3. transitions énergétiques: le contexte européen

- politique européenne dispersée (énergie hors domaine partagé)
- fiasco du marché des quotas de CO₂ (↘ 3 à 5 €/t, 2 Gt non échangées, excédents de quotas 8,5 Gt aux enchères d'ici 2020) → pas d'investissements dans la décarbonation de l'économie européenne (*)
- sorties du nucléaire (Allemagne, Belgique, Espagne, Italie, Suède, Suisse), crise nucléaire française
- accélérations des transitions énergétiques européennes (Suède, Danemark, Allemagne, Autriche, France, etc.)
- marchés de l'électricité intégrés, réseaux interconnectés
- ▶ injection croissante de l'électricité renouvelable

EU ETS supply/demand balance in 2014 and projections until 2020.



(*) i4CE – Institute for Climate and Energy (CDC) <http://www.i4ce.org/fr/>
 EUA ≡ European Emission Allowance
 CER ≡ Certified Emission Reduction

1. introduction



1.4. les grandes transitions énergétiques européennes

- **Allemagne:** *Energiekonzept, Energiewende* (2010)

- ▶ -80% à -95% de gaz à effet de serre en 2050 (base 1990)
- ▶ -50% de consommation primaire en 2050 (base 2008)
- ▶ -25% de consommation électrique en 2050 (base 2008)
- ▶ 60% d'énergie finale consommée = énergies renouvelables en 2050
- ▶ 80% de la consommation électrique = énergies renouvelables en 2050
- ▶ **sortie du nucléaire en 2022**



- **Danemark:** *Energiaftalen* (2012)

- ▶ 35% de la consommation d'énergie finale = énergies renouvelables en 2020
- ▶ 50% de la consommation électrique = énergie éolienne en 2020
- ▶ 100% de la consommation d'électricité et de chaleur = énergies renouvelables en 2035
- ▶ 100% de l'approvisionnement énergétique danois = énergies renouvelables en 2050



- **France:** *loi relative à la transition énergétique pour la croissance verte* (2015)

- ▶ -40 % de gaz à effet de serre en 2030, -75% en 2050 (base 1990)
- ▶ -20% d'énergie finale consommé en 2030; -50% d'énergie finale en 2050 (référence 2012)
- ▶ 32 % d'énergie finale consommée = énergies renouvelables en 2030
- ▶ **production maximale d'électricité d'origine nucléaire 63,2 GW, part du nucléaire dans l'électricité 50 % en 2025**



1. introduction

1.4. les renouvelables: une réponse soutenable

chaque heure
↓
énergie solaire moyenne reçue sur Terre
>
consommation humanité annuelle

1 TWh \equiv 0,086 Mtep ; 1 tep \equiv 11625 kWh ; 1 Gtep \equiv 11625 TWh

- ▶ ressources renouvelables mondiales immenses et mondialement réparties
- ▶ énergie de flux et de stock → conversions? distribution? stockage?



$I_0 = 1360 \text{ W/m}^2$
($I_{\text{moy}} = 340 \text{ W/m}^2$)

134.000 Gtep/an



13 Gtep/an (EP)
9,4 Gtep/an (EF)

2. la structure énergétique du Danemark

2.1. caractéristiques



- politique planifiée démocratiquement depuis 1976
- rejet démocratique (débats publics + parlement) du nucléaire (mars 1985)
- baisse continue de consommation EP:
 - Danemark: 46,4 MWh/hab (1972) → 38,8 MWh (3,34 tep)/hab (2012) → 3,27 tep/hab (2014)
 - France : 41,2 MWh/hab (1972) → 46,3 MWh (3,98 tep)/hab (2012) → 3,90 tep/hab (2014)
- forte baisse des émissions GES (hors UTFC): 15,6 tCO₂éq/hab (1972) →
 - 13,4 tCO₂éq/hab (1990) → 9,2 tCO₂éq/hab (2012) ► -31,0% par rapport à 1990
 - France^(*): 9,65 tCO₂éq/hab (1990) → 7,6 tCO₂éq/hab (2012) ► -21,3% par rapport à 1990
- PIB/hab DK/F = 1,4 ► DK 210,9 tCO₂éq/M€PIB - France: 243,8 tCO₂éq/M€PIB (+15,5%)



le Danemark

lat. N 57°42' - N 54°35'

42922 km²

7314 km de côtes

391 îles

16% de forêts

0,1°C janvier

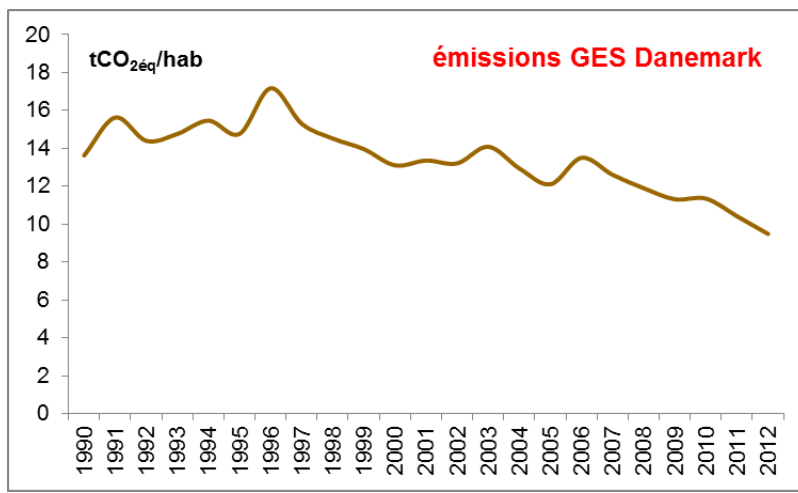
17,3°C juillet

1780 h d'ensoleillement

669 mm de pluie/an

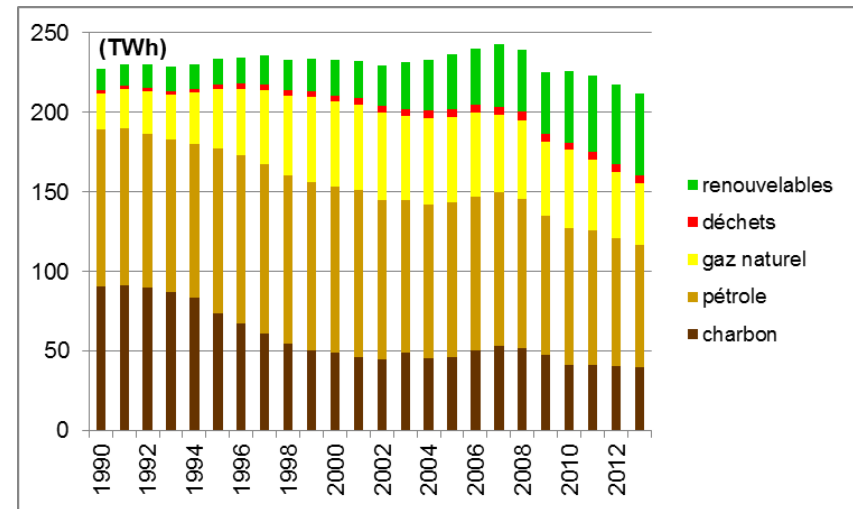
5,63 millions d'habitants

130,5 habitants/km²



(*) calcul officiel à 4 gCO₂éq/kWh_e nucléaire

source: Danish Energy Agency

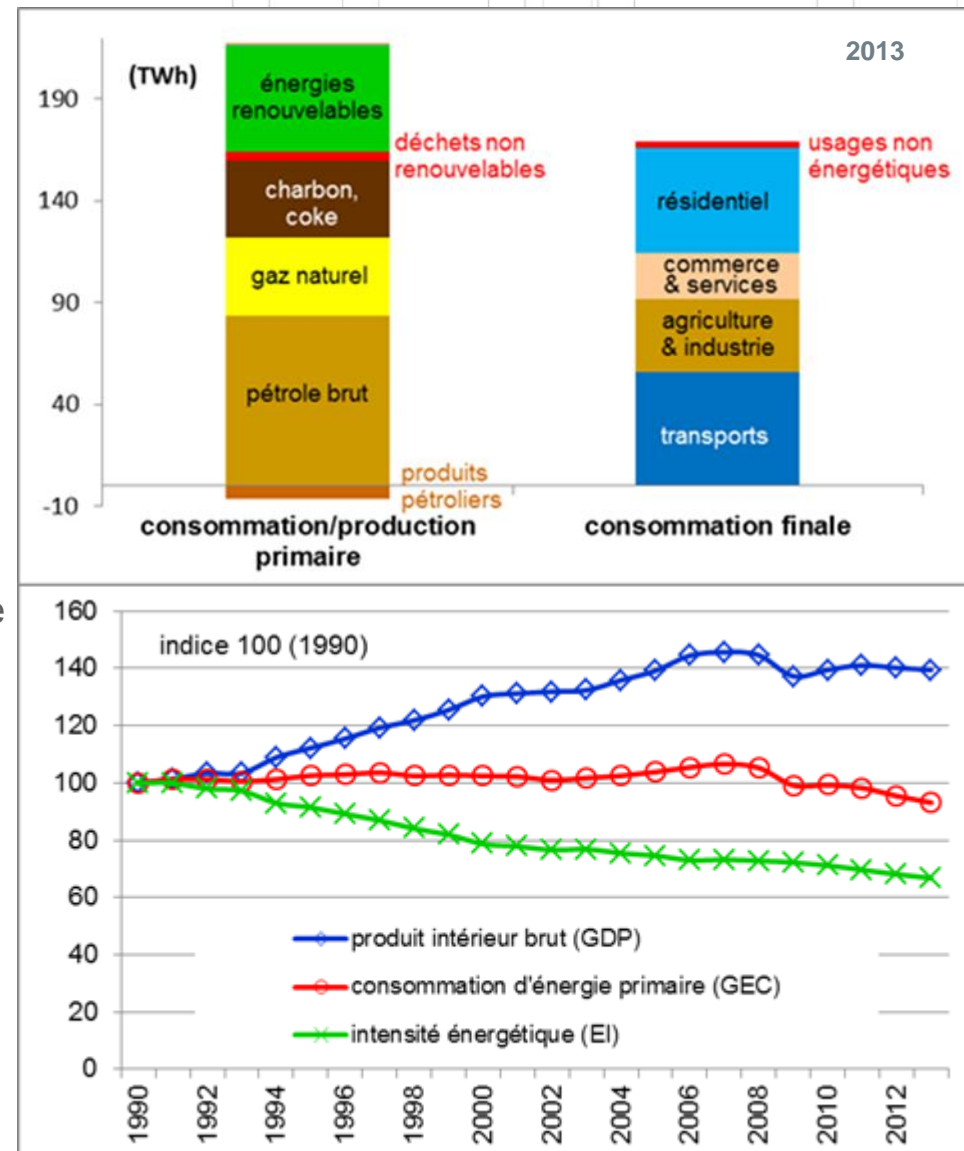


2. la structure énergétique du Danemark

2.1. caractéristiques (suite)

- grande efficacité énergétique $EF/EP = 78\%$ en 2014 (France: 57%)
- faible intensité énergétique IEP (2012) = $0,887 \text{ kWh/€}$ (France $1,48 \text{ kWh/€} \equiv \times 1,7$)
- 1^{er} producteur mondial éolien/habitant: 2066 kWh/hab en 2014 (France 258 kWh/hab)
- premiers parcs éoliens offshore
- leader mondial d'électricité renouvelable intermittente et de cogénération
 - cogénération = $60,8\%$ de la production électrique $\approx 100\%$ de l'électricité hors éolien et photovoltaïque (France 3%)
 - cogénération $\approx 73\%$ de la chaleur des réseaux de chaleur
 - cogénération → rendement 98% (47% électricité, 61% chaleur)
 - électricité renouvelable variable 43% (2014)
 - EnR = $53,4\%$ électricité (2014)
 - électricité éolienne $42,1\%$ (2015)
- réseaux de chaleur (50% habitat, $71,5\%$ tertiaire)
- indépendance énergétique élevée 90% (France 10%)
- part élevée des ENR: $26,3\%$ EP (2014) ajustée des imports/exports (France $9,4\%$)

source: Danish Energy Agency



2. la structure énergétique du Danemark

2.1. caractéristiques (suite)

■ éolien européen 2014

– France:

141 W/hab,
258 kWh/hab

– Danemark:

855 W/hab (x6)
2066 kWh/hab (x8)

puissance cumulée (MW_e) ►

	Puissance cumulée fin 2013	Puissance cumulée fin 2014*	Puissance installée en 2014*	Mises hors service en 2014*
Allemagne	34 660,0	40 456,0	6 187,0	391,0
Espagne	22 959,0	22 986,5	55,0	27,5
Royaume-Uni**	11 209,0	12 474,5	1 265,5	0,0
France***	8 243,0	9 285,0	1 042,0	0,0
Italie	8 557,4	8 662,4	107,5	2,6
Suède	4 381,9	5 425,1	1 050,2	7,0
Portugal	4 731,0	4 914,4	183,4	0,0
Danemark	4 810,0	4 849,0	68,0	29,0
Pologne	3 389,5	3 834,0	444,5	0,0
Roumanie	2 783,0	3 221,0	438,0	0,0
Pays-Bas	2 713,0	2 852,0	139,0	0,0
Irlande	2 049,3	2 271,7	222,4	0,0
Autriche	1 684,0	2 095,0	411,0	0,0
Grèce	1 809,0	1 979,8	170,8	0,0
Belgique	1 653,0	1 959,0	306,0	0,0
Bulgarie	676,7	686,8	10,1	0,0
Finlande	449,0	627,0	184,0	6,0
Croatie	254,5	340,2	85,8	0,0
Hongrie	329,0	329,0	0,0	0,0
Estonie	248,0	302,7	54,7	0,0
Lituanie	278,8	279,3	0,5	0,0
Rép. tchèque	262,0	278,6	16,6	0,0
Chypre	146,7	146,7	0,0	0,0
Lettonie	67,0	67,0	0,0	0,0
Luxembourg	58,3	58,3	0,0	0,0
Slovaquie	5,0	5,0	0,0	0,0
Slovénie	2,4	3,4	1,0	0,0
Malte	0,0	0,0	0,0	0,0
Total UE 28	118 409,5	130 389,4	12 442,9	463,0

*Estimation. **Chiffres provisoires au 3^e trimestre 2014. ***Départements d'outre-mer non inclus pour la France. Source: EurObserv'ER 2015

source: EUR'observ'ER

production annuelle (TWh_e) ▼▼

	2013	2014
Allemagne	51,700	55,969
Espagne	53,903	51,138
Royaume-Uni	28,434	31,450
France**	16,034	17,000
Italie	14,897	15,080
Portugal	12,015	12,300
Danemark	11,123	11,628
Suède	9,842	10,500
Pologne	6,077	7,200
Pays-Bas	5,603	5,806
Roumanie	4,047	5,724
Irlande	4,542	4,900
Belgique	3,635	4,800
Grèce	4,139	4,500
Autriche	3,151	3,033
Bulgarie	1,240	1,304
Finlande	0,777	1,110
Croatie	0,517	0,704
Hongrie	0,717	0,690
Estonie	0,529	0,600
Lituanie	0,600	0,600
Rép tchèque	0,481	0,498
Chypre	0,231	0,230
Lettonie	0,120	0,120
Luxembourg	0,081	0,080
Slovaquie	0,006	0,006
Slovénie	0,004	0,004
Malte	0,000	0,000
UE 28	234,444	246,974

*Estimation. **Départements d'outre-mer non inclus pour la France. Source: EurObserv'ER 2015

2. la structure énergétique du Danemark



Surfaces de parcs solaires thermiques* en service par habitant
(m²/hab. et kWth/hab.) en 2014**

2.1. caractéristiques (suite)

▪ solaire thermique européen 2014

puissance solaire thermique installée 2014:

France: 29 W_{th}/hab

Danemark: 117W_{th}/hab (x4)

ensoleillement: Danemark 1409-1811 h/an
(France 1641-2917 h/an)

Pays	m ² /habitant	kWth/habitant
Chypre	0,782	0,547
Autriche	0,607	0,425
Grèce	0,393	0,275
Allemagne	0,223	0,156
Danemark	0,168	0,117
Malte	0,118	0,082
Portugal	0,109	0,076
Slovénie	0,104	0,073
Rép. tchèque	0,099	0,070
Luxembourg	0,087	0,061
Espagne	0,074	0,052
Irlande	0,065	0,046
Italie	0,062	0,044
Pays-Bas	0,053	0,037
Belgique	0,052	0,037
Suède	0,049	0,034
Pologne	0,046	0,032
France***	0,042	0,029
Croatie	0,037	0,026
Slovaquie	0,031	0,022
Hongrie	0,022	0,015
Bulgarie	0,012	0,008
Royaume-Uni	0,011	0,007
Lettonie	0,009	0,007
Finlande	0,009	0,006
Roumanie	0,009	0,006
Estonie	0,008	0,005
Lituanie	0,005	0,003
Total Union européenne 28	0,093	0,065

* Toutes technologies, y compris le non vitré. ** Estimation. *** Départements d'outre-mer inclus.
Source : EurObserv'ER 2015

2. la structure énergétique du Danemark

2.1. caractéristiques (suite)

- photovoltaïque européen 2014

production 2014:

France 88,9 kWh/hab

Danemark 105,9 kWh/hab (x1,18)

Production brute d'électricité d'origine photovoltaïque dans les pays de l'Union européenne en 2013 et 2014* (en TWh)

	2013	2014
Allemagne	31,010	35,115
Italie	21,589	22,306
Espagne	8,327	8,218
France**	4,661	5,905
Royaume-Uni	1,989	4,050
Grèce	3,648	3,792
Belgique	2,644	2,883
Rép. tchèque	2,033	2,123
Roumanie	0,420	1,295
Bulgarie	1,361	1,244
Autriche	0,582	0,785
Pays-Bas	0,487	0,785
Portugal	0,479	0,627
Slovaquie	0,588	0,625
Danemark	0,518	0,596
Slovénie	0,215	0,257
Luxembourg	0,074	0,095
Lituanie	0,045	0,073
Chypre	0,045	0,061
Malte	0,031	0,058
Suède	0,035	0,047
Croatie	0,011	0,035
Hongrie	0,025	0,027
Finlande	0,006	0,008
Pologne	0,001	0,007
Irlande	0,001	0,001
Estonie	0,001	0,001
Lettonie	0,000	0,000
Total UE 28	80,825	91,019

* Estimation. ** DOM non inclus. Source : EurObserv'ER 2015

Puissance photovoltaïque connectée et cumulée dans les pays de l'Union européenne en 2013 et 2014* (en MWC)

	2013			2014		
	Réseau	Hors réseau	Total	Réseau	Hors réseau	Total
Allemagne	36 337,0	65,0	36 402,0	38 236,0	65,0	38 301,0
Italie	18 420,0	12,0	18 432,0	18 609,0	13,0	18 622,0
France**	4 614,3	10,7	4 625,0	5 943,2	10,8	5 954,0
Royaume-Uni	2 851,0	2,3	2 853,3	5 377,0	2,3	5 379,3
Espagne	4 759,8	25,2	4 785,0	4 761,8	25,5	4 787,3
Belgique	2 922,0	0,1	2 922,1	3 024,0	0,1	3 024,1
Grèce	2 578,8	7,0	2 585,8	2 595,8	7,0	2 602,8
Rép. tchèque	2 063,5	0,4	2 063,9	2 060,6	0,4	2 061,0
Roumanie	1 022,0	0,0	1 022,0	1 292,6	0,0	1 292,6
Pays-Bas***	741,0	5,0	746,0	1 043,0	5,0	1 048,0
Bulgarie	1 018,5	0,7	1 019,2	1 019,7	0,7	1 020,4
Autriche	620,8	5,2	626,0	779,8	5,5	785,2
Danemark	571,0	1,4	572,4	607,0	1,5	608,5
Slovaquie	588,0	0,1	588,1	590,0	0,1	590,1
Portugal	299,0	3,8	302,8	418,0	5,0	423,0
Slovénie	248,1	0,1	248,2	255,9	0,1	256,0
Luxembourg	95,0	0,0	95,0	110,0	0,0	110,0
Lituanie	68,0	0,1	68,1	68,0	0,1	68,1
Chypre	33,9	0,9	34,8	63,6	1,1	64,8
Suède	34,8	8,4	43,2	51,6	8,4	60,0
Malte	28,2	0,0	28,2	54,2	0,0	54,2
Hongrie	34,3	0,6	34,9	37,5	0,7	38,2
Croatie	19,5	0,5	20,0	33,5	0,7	34,2
Pologne	2,0	2,4	4,4	27,0	2,9	29,9
Finlande	0,2	9,0	9,2	0,2	11,0	11,2
Lettonie	1,5	0,0	1,5	1,5	0,0	1,5
Irlande	0,2	0,9	1,0	0,2	0,9	1,1
Estonie	0,0	0,1	0,2	0,0	0,1	0,2
Total UE 28	79 972,4	161,9	80 134,3	87 060,6	168,0	87 228,6

* Estimation. ** DOM non inclus. *** Pays-Bas : anciennes données pour le hors réseau, non actualisées.
Note : Selon le ministère de l'Industrie et du Commerce tchèque, la République tchèque a mis hors service 2,9 MWC de puissance solaire en 2014. Source : EurObserv'ER 2015

2. la structure énergétique du Danemark

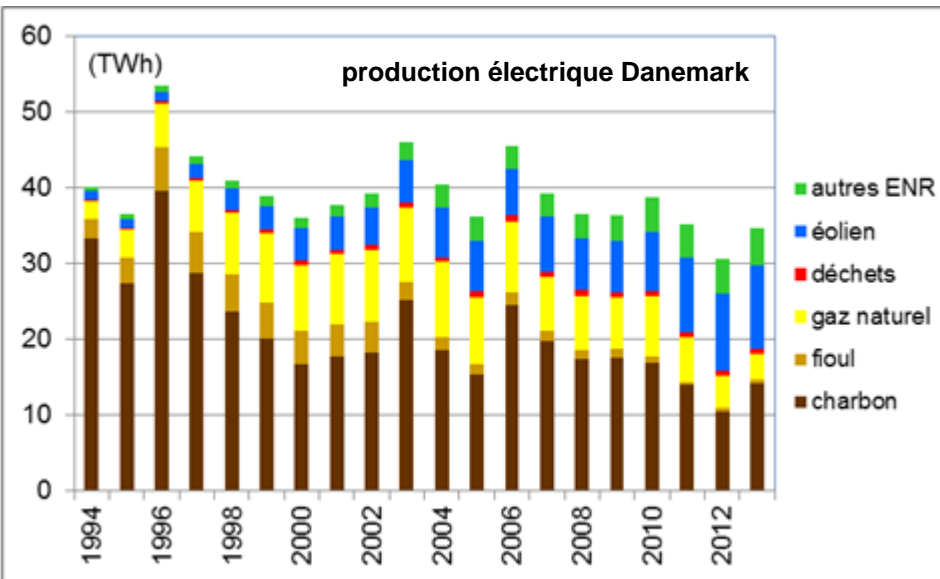
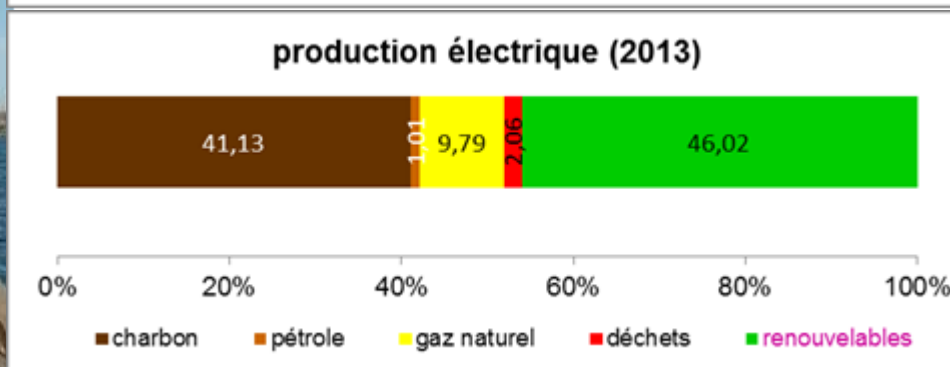
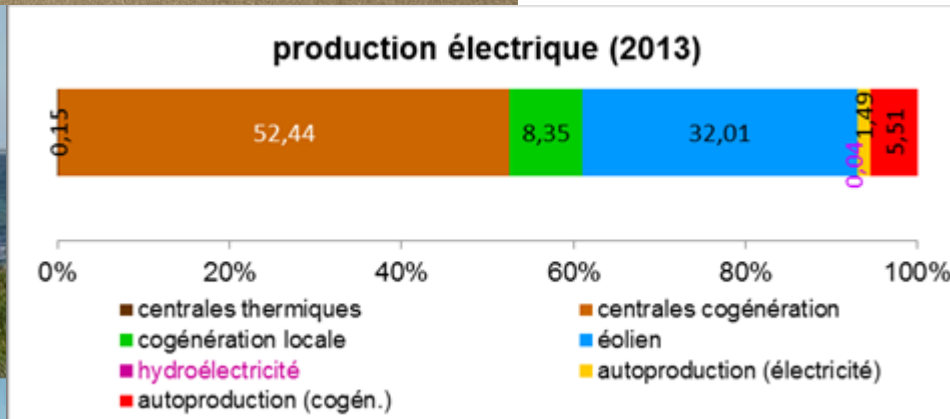
2.2. structure énergétique

production électricité/chaaleur

- cogénération généralisée
dont ENR biomasse (18,6% CHP, 26,6% chp)
- forte pénétration éolien + photovoltaïque
- ▶ 90% éoliennes propriété citoyenne
(coopératives, municipalités, fermiers, individus)
- élimination progressive fioul, gaz et charbon



source: Danish Energy Agency

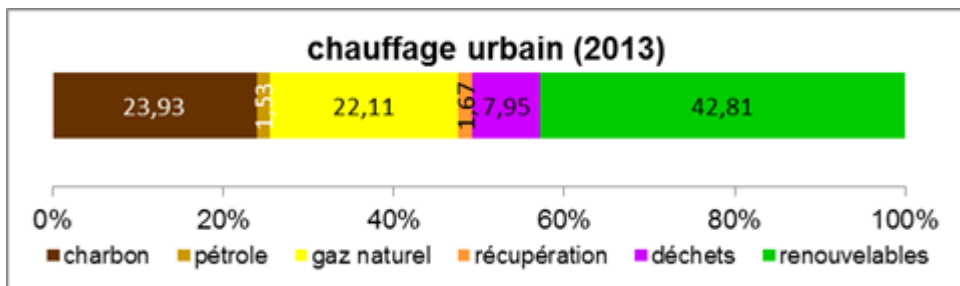
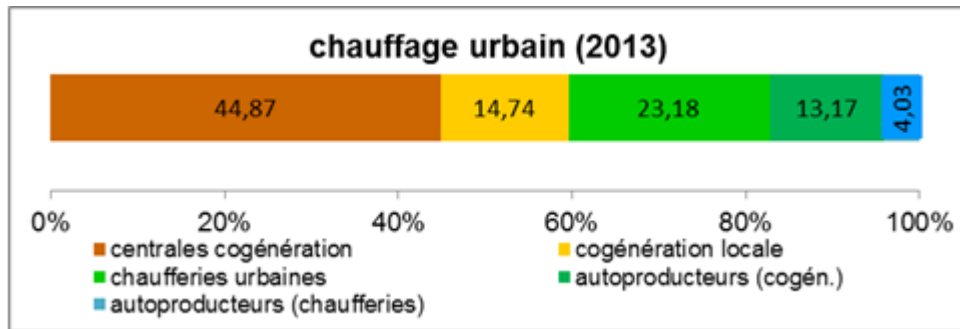


2. la structure énergétique du Danemark

2.2. structure énergétique (suite)

production électricité/chaaleur

- réseaux de chaleur généralisés
 - ENR 42,8% en 2013
 - 50% résidentiel
 - 71,5% tertiaire (commerces, services)
- cogénération ► 73% réseaux de chaleur



source:
Danish Energy Agency



◀ DH_Mårup (Samsø)



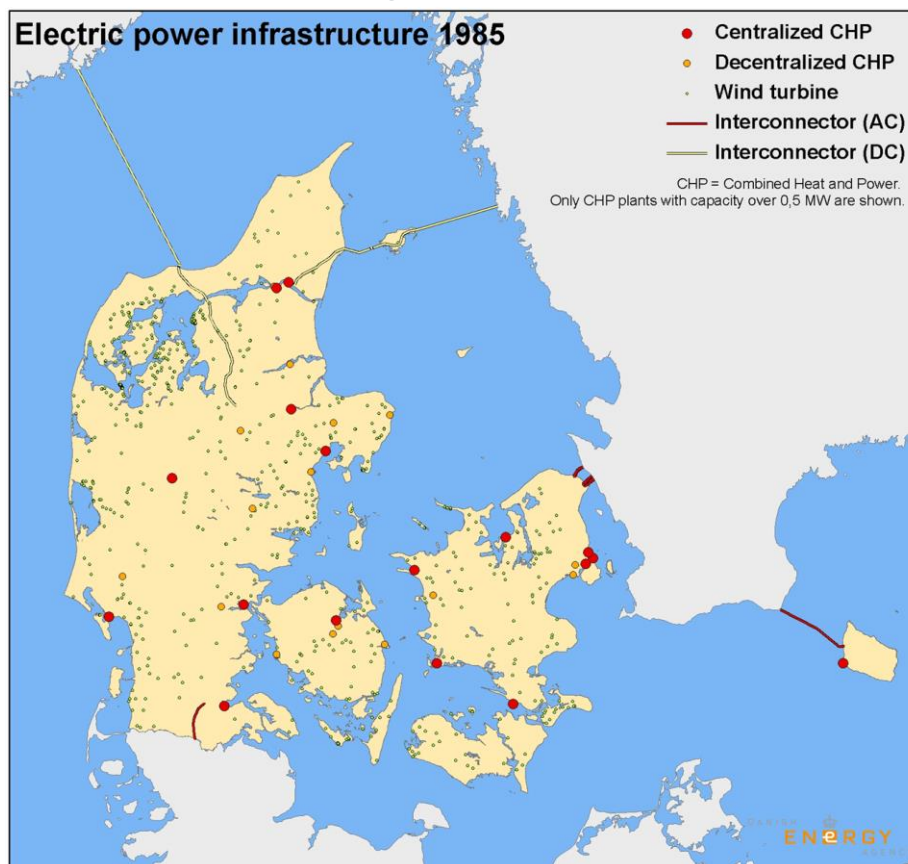
▼ CHP-DH Gråsten

2. la structure énergétique du Danemark

2.2. structure énergétique (suite)

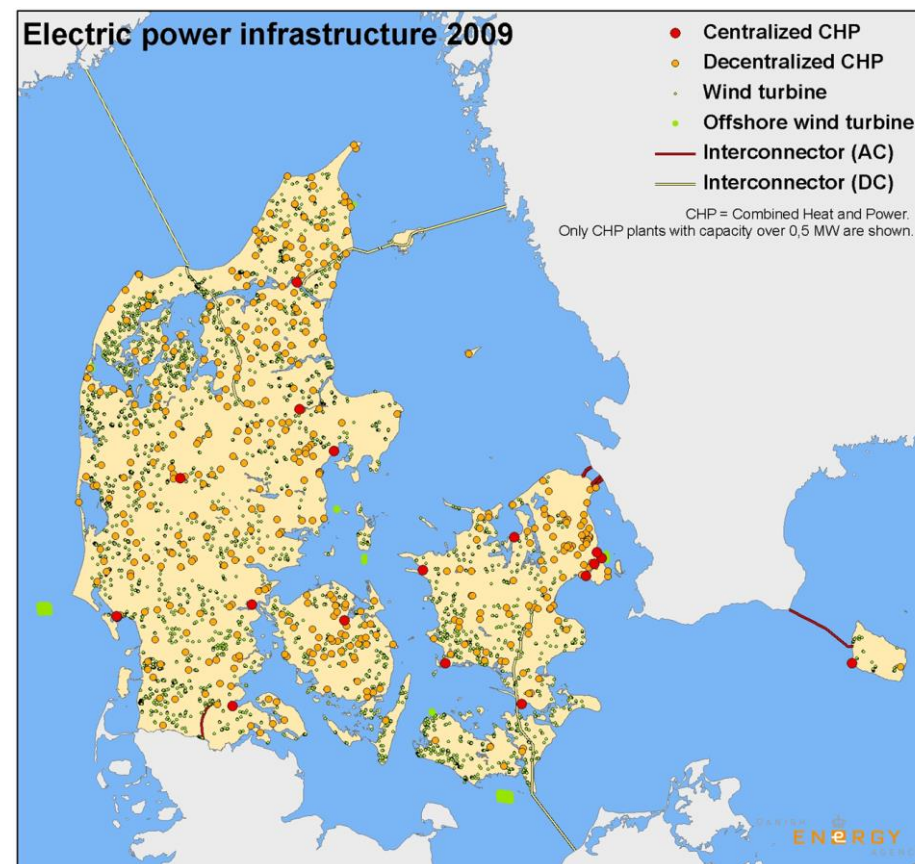
production électricité/chaleur

- 1985: ► peu de réseaux électriques décentralisés
- peu de cogénération décentralisée



- 2009

- réseaux électriques décentralisés
- fermes éoliennes offshore
- généralisation de la cogénération
- extension des réseaux de chauffage

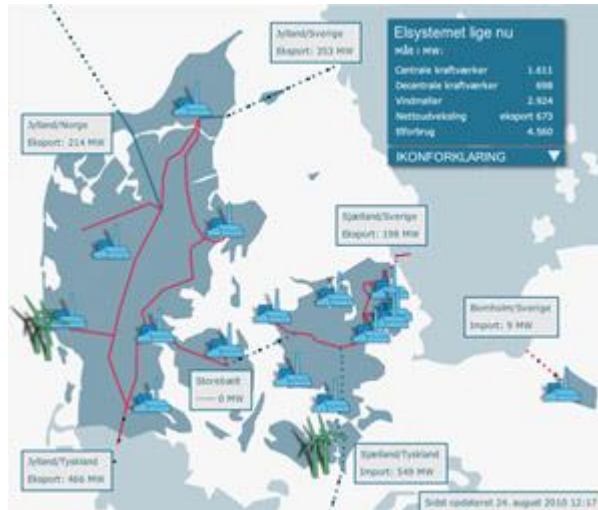


2. la structure énergétique du Danemark

2.2. structure énergétique (suite)

production électricité/chaaleur

- Energinet.dk ► opérateur public de transmission électricité-gaz (TSO)
 - 2 réseaux nationaux de transport 400 kV séparés → réseaux régionaux de transmission 150 kV (ouest) et 132 kV (est) ← éoliennes
- réseaux locaux de distribution moyenne (25 et 99 kV) et basse tension
 - propriétés de compagnies locales, publiques (municipalités)



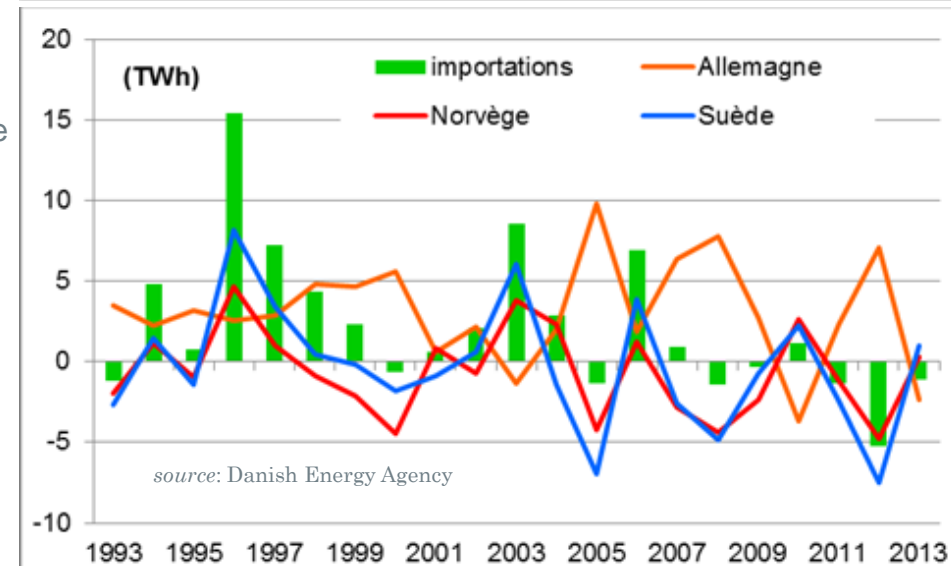
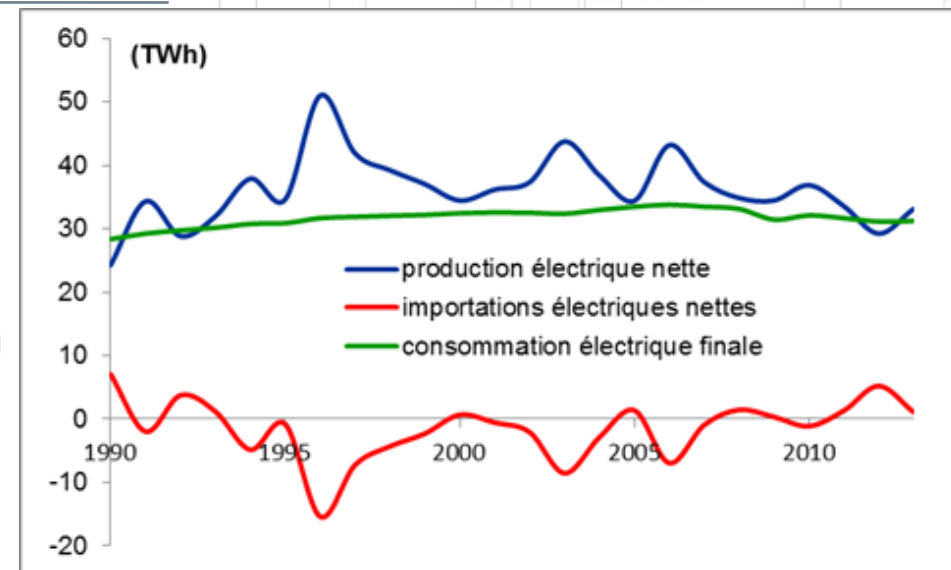
2. la structure énergétique du Danemark

2.2. structure énergétique (suite)

production électricité/chaaleur

- **grande stabilité fréquence-tension du réseau électrique danois:**
 - ▶ 2^{ème} pays leader européen de plus faible indice de durée moyenne annuelle d'interruption de réseau électrique (SAIDI) après le Luxembourg
 - ▶ interconnexions Norvège-Suède-Allemagne (Angleterre en cours)
 - stabilisation (U, f), équilibrage importations-exportations (excès 4,2%)
 - stockage massif STEP + réseau
 - injection massive éolien + PV
 - ▶ grandes CHP
 - ▶ postes régulation automatique des réseaux régionaux
 - injection locale électricité intermittente {éolien + PV}
 - modulation CHP locales (biomasse, gaz)
 - stockage électrique local (batteries, véhicules électriques) + hydrogène (PEMFC, SOFC)
 - **interconnexion avec réseaux locaux de chaleur**
 - ▶ stockage thermique local: eau chaude (réseaux de chaleur), PAC géothermales
 - **interconnexion avec réseaux locaux de gaz:** stations de méthanation
 - ▶ compensateurs synchrones (centrales électriques régionales et locales)
 - injection automatique de puissance réactive
 - stabilité à faible coût

⇒ matrice **Smart System** en place



2. la structure énergétique du Danemark

2.2. structure énergétique (suite)

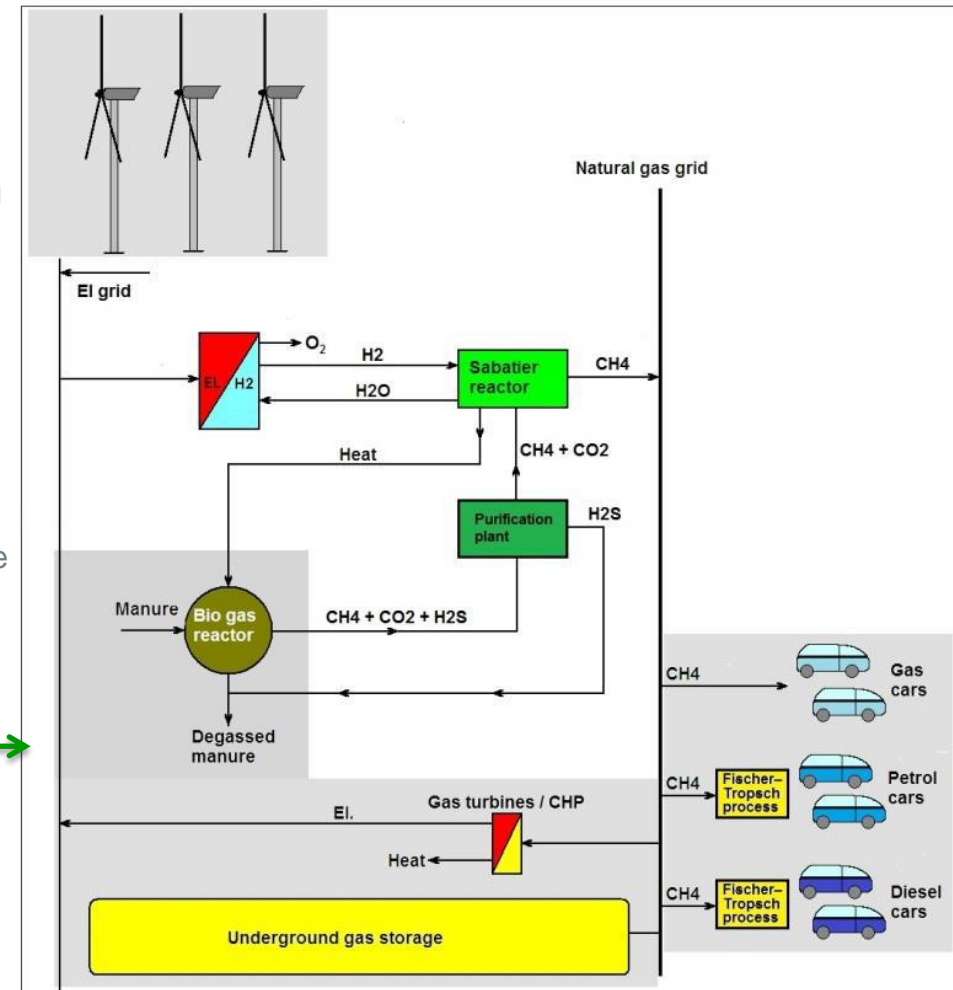
production électricité/chaleur

- *grande stabilité fréquence-tension du réseau électrique danois:*
 - ▶ 2^{ème} pays leader européen de plus faible indice de durée moyenne annuelle d'interruption de réseau électrique (SAIDI) après le Luxembourg
 - ▶ interconnexions Norvège-Suède-Allemagne (Angleterre en cours)
 - stabilisation (U, f), équilibrage importations-exportations (excès 4,2%)
 - stockage massif STEP + réseau
 - injection massive éolien + PV
 - ▶ grandes CHP
 - ▶ postes régulation automatique des réseaux régionaux
 - injection locale électricité intermittente {éolien + PV}
 - modulation CHP locales (biomasse, gaz)
 - stockage électrique local (batteries, véhicules électriques) + hydrogène (PEMFC, SOFC)
 - *interconnexion avec réseaux locaux de chaleur*
 - ▶ stockage thermique local: eau chaude (réseaux de chaleur), PAC géothermales
 - *interconnexion avec réseaux locaux de gaz:* stations Power-to-gas $\text{CO}_2 + 2\text{H}_2 \rightarrow \text{CH}_4 + 2\text{H}_2\text{O}$ à partir du biogaz (+50% méthane)
 - ▶ *compensateurs synchrones* (centrales électriques régionales et locales)
 - injection automatique de puissance réactive
 - stabilité à faible coût

⇒ matrice **Smart System** en place



Siemens: 250 MVAR



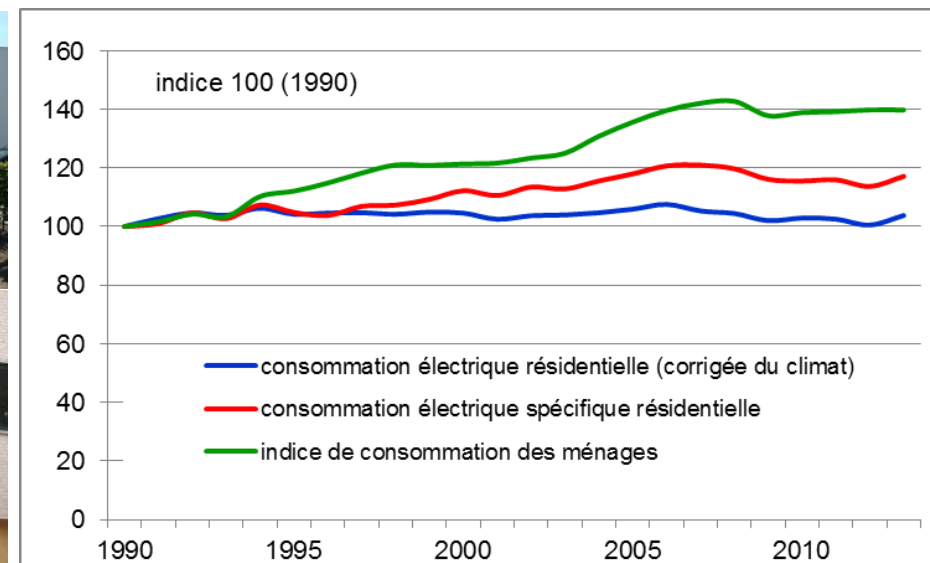
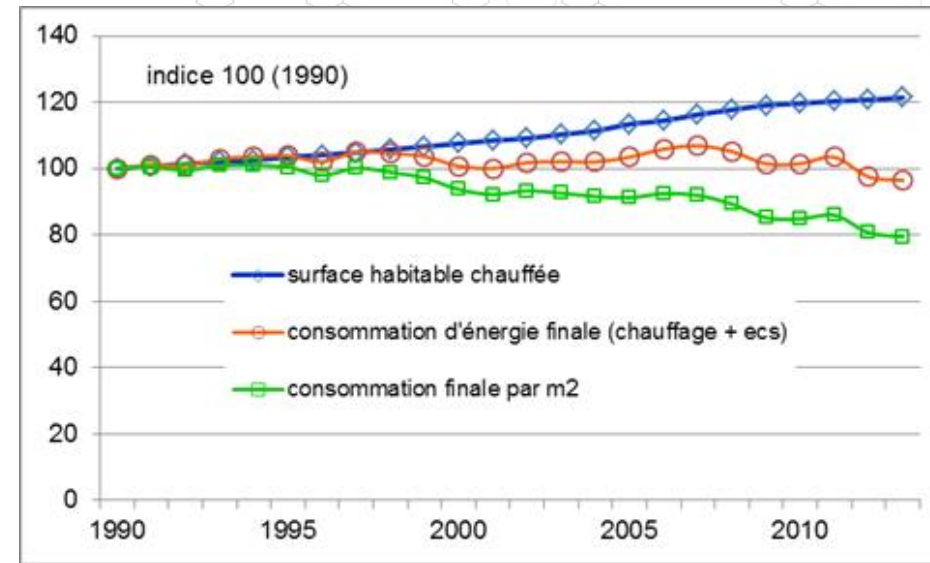
2. la structure énergétique du Danemark

2.2. structure énergétique (suite)

efficacité

- isolation massive des bâtiments
 - ▶ baisse consommation EF/m² (chauffage + ECS) -20,5% 1990→ 2013
 - élimination planifiée du chauffage électrique
 - ▶ remplacement par PAC, chauffage solaire
 - remplacement des appareils électriques
- ⇒ secteur résidentiel: 30,2% en 2013 (DJU 3194, EF 170 kWh/m².an)
France: 28,4% en 2013 (DJU 2327, EF 220 kWh/m².an)
- ⇒ consommation électrique (2014):
Danemark 5,48 MWh/(hab.an)
France 7,26 MWh/(hab.an) (×1,33)

source:
Danish Energy Agency



2. la structure énergétique du Danemark



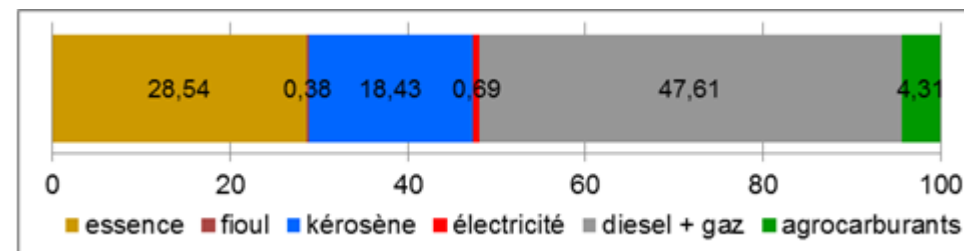
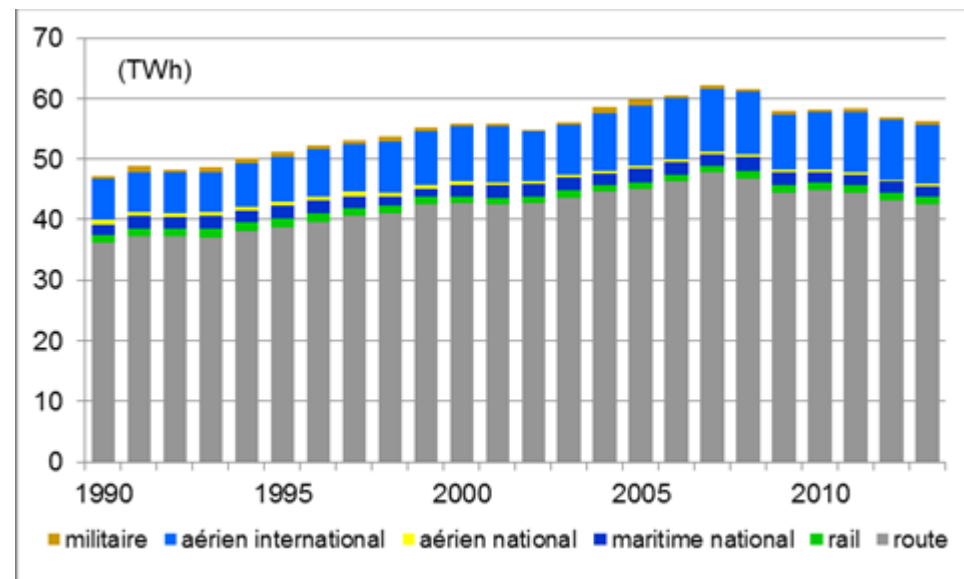
2.2. structure énergétique (suite)

transports

- 33,2% consommation finale (2013) (≈ France)
 - ▶ baisse régulière consommation depuis 2007
- développement massif des transports en communs
 - ▶ trains électriques, tramways, métros
- développement massif des pistes cyclables et déplacements cyclistes
 - ▶ Copenhague 1^{ère} ville mondiale (>50%)
 - ▶ voies 1/3 véhicules - 2/3 cycles
- fret routier → report sur le rail
- véhicules plus légers et sobres:

Danemark: 1249 kg ; 117 gCO₂/km

France: 1386 kg ; 124 gCO₂/km



source: Danish Energy Agency



3. la planification démocratique du Danemark

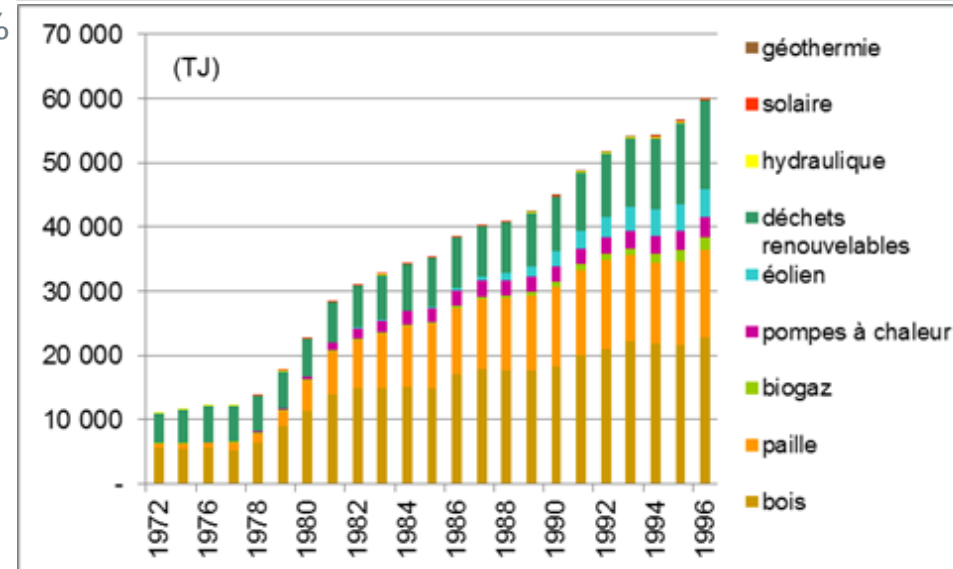
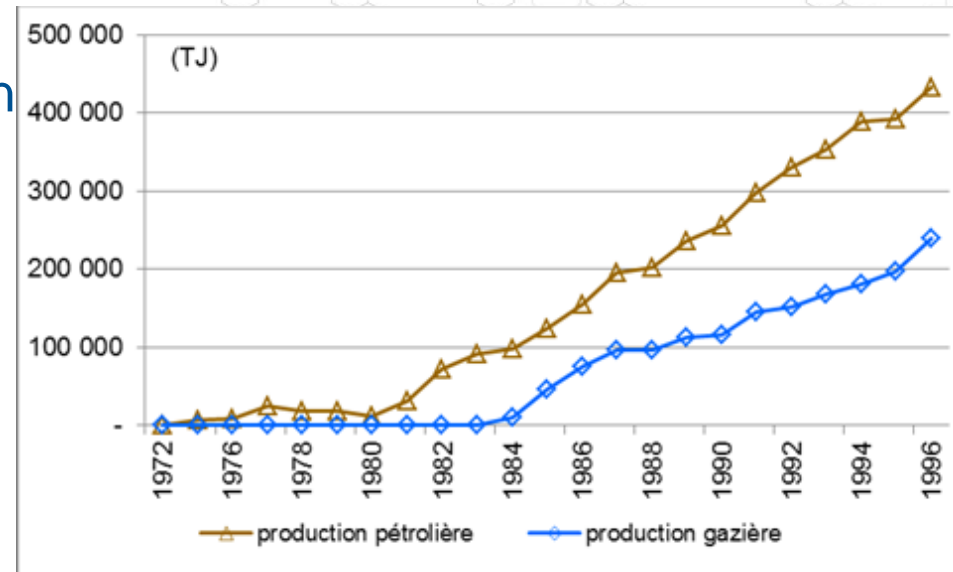
3.1. le changement de paradigme 1976-1981

- 1972: la crise pétrolière
 - **dépendance pétrolière du Danemark:** 100% transport, 95% électricité, 94% chauffage
- 1976
 - Ministère du Commerce missionné par le Parlement Danois
 - ▶ premier plan énergétique danois
 - ▶ remplacement du pétrole par le nucléaire et le gaz, économies d'énergie
 - contestation de chercheurs, associations
 - ▶ plan alternatif au nucléaire
 - ▶ 1^{er} couplage d'une éolienne (illégal: *Christian Riisager* → manifestations, négociations)
 - ▶ droit de couplage des particuliers au réseau
- 1979
 - mise en place d'une subvention éolienne
- 1980
 - création de la DEA (Agence Danoise de l'Energie)
- 1981: Energy Plan 81
 - ▶ déconnecter croissance – consommation d'énergie (mais +30% jusqu'en 2000)
 - ▶ 4 options : nucléaire ou renouvelables ou gaz ou BAU (mais recours massif au charbon)
 - ▶ création du Ministère de l'Energie (ex-DEA)

3. la planification démocratique du Danemark

3.2. essor des renouvelables et de la cogénération 1982-1989

- 1983: plan alternatif *Energy for the Future* (Université Aalborg)
 - diminution de 28% de la consommation EP
 - ▶ recours massif à la **cogénération**, aux **énergies renouvelables** (éolienne, biomasse) et aux **économies d'énergie**
 - ▶ production gazière et pétrolière (Mer du Nord)
- 1985
 - étude technique de faisabilité: île de Bornholm → éolien: 25% électricité, cogénération 75% électricité (+ chaleur)
 - débats publics → GES danois, nucléaire
 - ▶ mars 1985: **rejet définitif de l'option nucléaire par le Parlement Danois**
- 1989: *Energy Action Plan* (Université Aalborg)
 - ▶ propositions: **régulation publique** → économies d'énergie, cogénération, énergies renouvelables

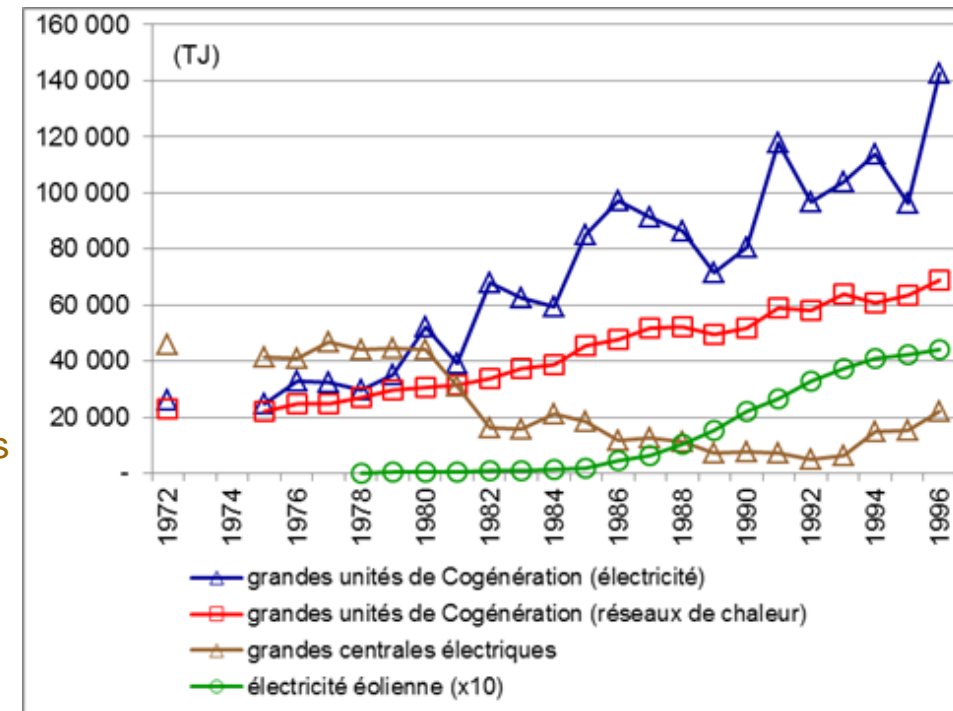


source:
Danish Energy Agency

3. la planification démocratique du Danemark

3.3. l'action climatique 1990-1995

- 1990: Energy 2000. A Plan of Action for a Sustainable Development (Ministry of Energy)
 - priorité : émissions de CO₂ en 2005 = -20% émissions CO₂ de 1988
 - initiatives de régulations publiques
 - participation publique aux décisions énergétiques
 - ▶ développement des ENR (éolien), de la cogénération, des réseaux de chaleur
 - ▶ fermeture progressive des grandes centrales électriques
- 1990-1993
 - gouvernement conservateur
 - ▶ Ministère de l'Énergie → Ministère de l'Industrie
 - ▶ suppression des régulations publiques
 - ▶ chute de l'investissement éolien 1993 = (1989-91) ÷ 2
 - ▶ augmentation production électrique par centrales classiques
 - ▶ 1992: **taxe carbone** → particuliers (100 DKK-13,4 €/tCO₂)
- 1993
 - gouvernement centre-gauche
 - Plan Energy 2000-Follow-up
 - ▶ nouvelles régulations publiques (insuffisantes)
 - ▶ croissance production pétrole + gaz
 - ▶ 1993: **taxe carbone modulée** → industriels



source:
Danish Energy Agency

3. la planification démocratique du Danemark

3.4. vers la planification écologique 1996-2006

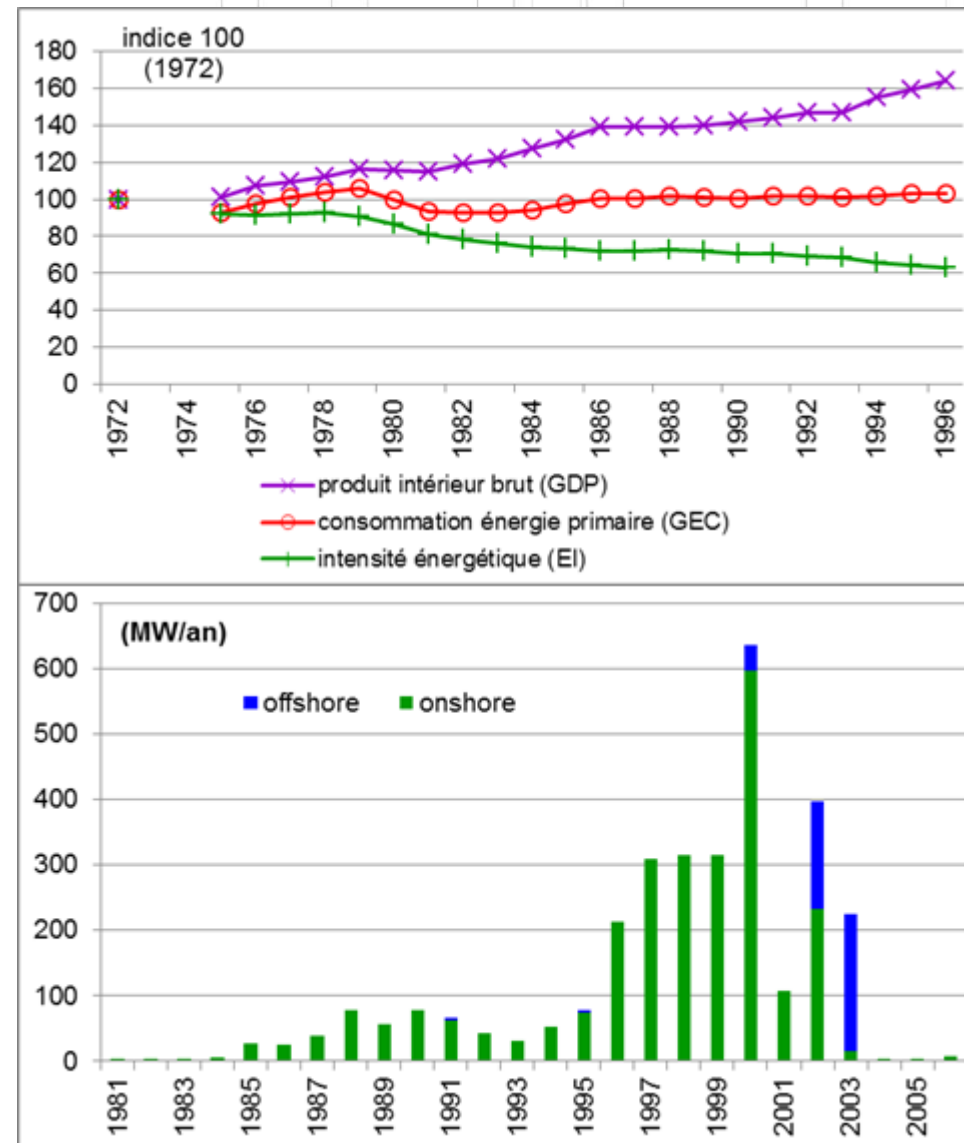
● 1996: premier bilan

- remplacement de 50% de la consommation du pétrole
- autosuffisance en gaz, pétrole, ENR (importation de charbon)
- stabilisation de la consommation totale
- baisse de 37% de l'intensité énergétique IE = EP/PIB
- baisse de 30% de consommation de combustible en chauffage (isolation, réseaux de chaleur urbains, cogénération)
- +50% réseaux de chaleur
- 1996 : cogénération = 49% consommation de chaleur et 48% consommation électrique
- biomasse : augmentation +340% (déchets, bois, paille, biogaz)
- éolien = 4% production électrique
- transports, électricité : augmentation de la consommation

● 1995-2006

- gouvernement néo-libéral (F.A. Rasmussen)
- directives libéralisation énergie (Commission Européenne)
- 1996: Plan **Energy 21** (libéral)
 - ▶ objectifs environnementaux officiels maintenus
 - ▶ extension taxe carbone → industries intensives
 - ▶ création **taxe soufre + taxe NO_x**
 - ▶ **Energi Akademiet: île de Samsø** 100% fossile → ENR en 2007
 - ▶ abandon de la participation publique aux décisions énergétiques
 - ▶ dérégulation de l'éolien et de la cogénération
 - ⇒ **arrêt des investissements éoliens**

source:
Danish Energy Agency

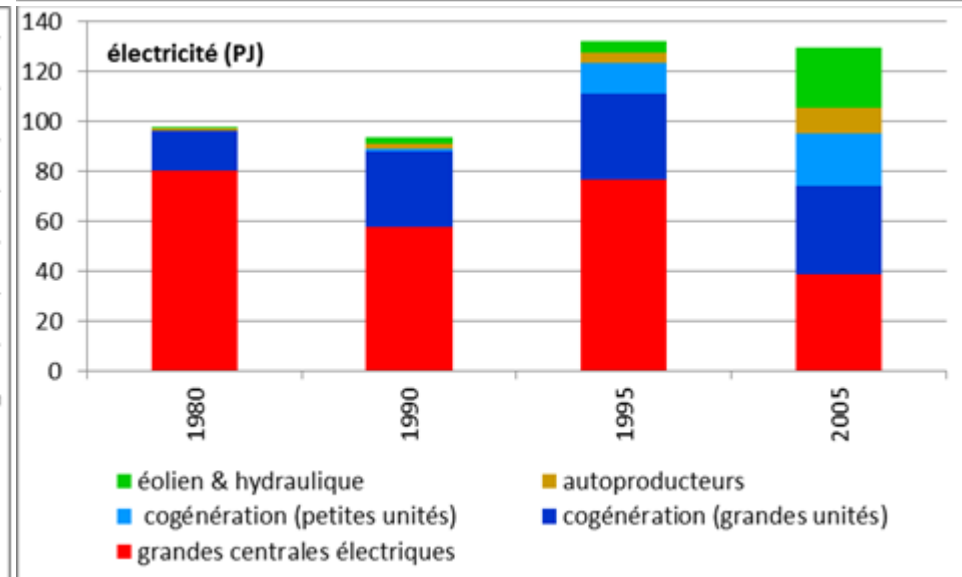
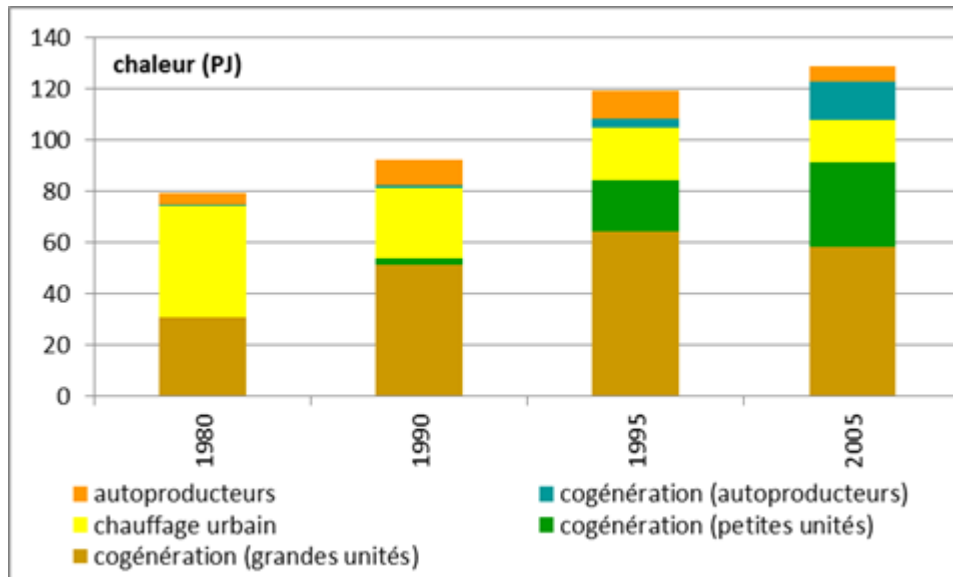
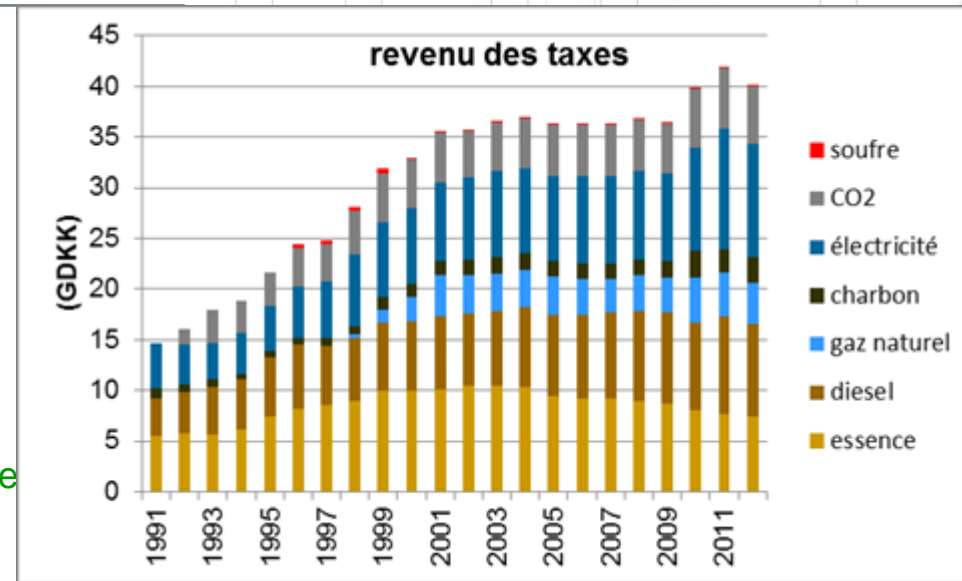


3. la planification démocratique du Danemark

3.4. vers la planification écologique 1996-2006

● 2005: deuxième bilan

- éolien et hydraulique = 18,3% de l'électricité
- cogénération = 44,3% électricité, 82,4% chaleur réseaux urbains
- 2001: rapport DEA *injection éolienne massive/stabilité réseau* missionné par le Parlement Danois
- loi électricité danoise (2004):
 - ▶ obligation effacement cogénération/production éolienne
 - ▶ privilégier la résolution nationale interne des problèmes équilibre réseau électrique / exportation des excès éoliens à bas prix
 - ▶ financement réseaux électriques d'interconnexion



source:
Danish Energy Agency

3. la planification démocratique du Danemark

3.4. vers la planification écologique 1996-2006 (suite)

• Samsø, l'île 100% renouvelable

- réseaux de chaleur (DH)/consommation {chauffage, ECS} :
22,4% en 1997 → 43,0% en 2005
- conversion aux énergies renouvelables (solaire, biomasse, géothermie) de plus de 50% des chauffages isolés à combustibles fossiles
- conversion progressive à l'agriculture biologique
- énergies renouvelables/consommation :
13,0% en 1997 → 99,7% en 2005
- électricité renouvelable : 11 éoliennes onshore de 1 MW ; 10 éoliennes offshore 2,3 MW ; 90% des éoliennes appartiennent à la population locale
- surface photovoltaïque par habitant la plus élevée du Danemark
- émissions/hab : 1997 (10,6 tCO₂, 19,7 kgSO₂, 78 kgNO_x)
→ 2005 (-3,7 tCO₂, -0,9 kgSO₂, -2,3 kgNO_x)
- transports : 39,7% en 1997 (gazole + essence, dont ferries 46%)
→ 41,3% consommation finale en 2005 (ferries :45%).
→ compensation 301 TJ combustibles fossiles ► exportation 286 TJ électricité EnR
→ véhicules électriques publics, 5 centres de recharge
→ une des deux lignes de ferries convertie au gaz naturel



3. la planification démocratique du Danemark

3.4. vers la planification écologique 1996-2006 (suite)

● Plan Samsø fossil-free 2030

- élimination des énergies fossiles d'ici 2030
- extension parcs éoliens, surfaces photovoltaïques→2025 ; extension des PAC, panneaux solaires thermiques→2020 ; augmentation biogaz, cultures énergétiques
- réseaux cyclables, véhicules individuels 50% électriques en 2020, 80% en 2030 ;
- transports publics 100% ENR en 2020 ; ferries 100% ENR en 2030
- économies d'énergie : -30% chauffage domestique, -5% chauffage industriel d'ici 2020
- -30% d'électricité dans le secteur public d'ici 2030 ; remplacement des pompes électriques et des éclairages peu efficaces ; utilisation des PAC géothermiques ; stabilisation de la consommation électrique des habitations ; installation de compteurs intelligents et de réseaux intelligents d'ici 2020
- Samsø soutenable : extension de l'agriculture biologique, de la biodiversité, de la protection de l'eau, de la gestion des déchets et du recyclage
- extension des partenariats intérieurs (coopératives, circuits courts, participation citoyenne, relations municipalités, chercheurs, industriels, commerçants, agriculteurs, formateurs, éducateurs, professeurs) et extérieurs (échanges internationaux, formations internationales, réseaux d'échanges d'expérience entre îles, tourisme intelligent et soutenable)



3. la planification démocratique du Danemark

3.5. le tournant décisif 2006-2012

- **oct 2006: annonce du Premier Ministre danois au Parlement**

- ▶ **objectif national: 100% d'indépendance pétrolière et nucléaire**

- **Energy Year 2006**

- 40 séminaires de l'IDA (Association des ingénieurs danois)
- 1600 ingénieurs et chercheurs universités Aalborg, DTU
- **plan IDA Energy 2030**
- ▶ **50% ENR en 2030**



The Government will set ambitious goals to ensure Denmark future self-sufficiency with environmentally sound energy.

This is a very long-term goal. But the supply of energy requires long-term planning and long-term investments.

Therefore, we must take the necessary decisions already at this stage. Later this year, the Government will present a long-term energy plan.

We will focus on substantially increasing use of renewable energy. We will set ambitious goals for utilizing energy more efficiently and effectively.

We will substantially enhance efforts to foster research, development and experiments within the energy field in order to develop both existing and new renewable energy sources.

We will focus strongly on developing bio-fuel for cars.

We will combine political regulation and market mechanisms, in order to ensure that investments are made in areas where we get maximum energy and environmental value for money.

We will pursue an energy policy characterized by common sense and foresight. Today, Denmark is the leading country in the world within the field of wind energy. We must capitalize on this head start. But it is unrealistic to think that Denmark's future energy needs can be supplied by wind power alone. We must develop new energy sources.

And we must ensure that the new energy sources are efficient and cost-effective. We will strive to ensure an energy and environment policy that goes hand in hand with growth and strong competitive power; an energy and environment policy that boosts rather than stifles job creation.

We have a good starting point. Today, sustainable energy accounts for 15 per cent of our energy consumption. And today we are second to none in the world in terms of utilizing energy efficiently and effectively. Over the past 25 years, our economy has grown by more than 50 per cent, without our energy consumption having increased. There are many who envy us and are keen to learn from us.

We are now setting new goals. New goals which ensure that Denmark will remain at the forefront in the energy and environmental field in Europe and the rest of the world. New goals which ensure that Danish policy will be both environmentally and economically sustainable.

3. la planification démocratique du Danemark

3.5. le tournant décisif 2006-2012 (suite)

● 2006: Energy Plan 2030 (IDA)

- - 50% des besoins de chauffage des bâtiments (isolation) ;
- - 50% de la demande électrique dans l'habitat et - 30% dans l'industrie ;
- - 40% de la consommation de combustibles dans l'industrie ;
- solaire = 15% des besoins de chauffage individuel et collectif ;
- +20% de la production électrique par cogénération industrielle ;
- diminution demande en transport par des réformes de taxation ;
- 20% transport routier → rail, navigation fluviale et maritime ;
- 20% des carburants routiers → biocarburants, électricité ;
- 10% du chauffage individuel → réseaux de chaleur à cogénération ;
- 10% des chaudières à gaz → micro-cogénérateurs à pile à combustibles ;
- remplacement des futures centrales électriques après 2015 par des centrales de cogénération à pile à combustibles SOFC (35 - 40% puissance installée 2030)
- doublement ressources en biomasse (y compris incinération déchets renouvelables)
- doublement des capacités éoliennes de 3 à 6 GW ;
- production électrique de 500 MW à partir des vagues et de 700 MW par photopiles ;
- 450 MWe de grandes PAC combinées aux centrales de cogénération et à la flexibilité de la demande électrique → optimiser l'intégration des sources éoliennes fluctuantes.

● 2007: Frederikshavn, ville à énergie positive en 2015

- projet détaillé : 20% ENR (2007) → 40% (2010) → 100% (2015) sur une base annuelle



"In Frederikshavn municipality we fully support the energy city Frederikshavn as a growth generator on the energy area. We are aware of the great potential to create business and new local workplaces. In Frederikshavn municipality we want to exceed the renewable energy and help reduce the current energy consumption because the transformation creates 'new sustainable livelihoods' for our businesses. We have proven this by renovating the municipal institutions, schools, and town hall."
Mayor Lars M. Møller

3. la planification démocratique du Danemark

3.5. le tournant décisif 2006-2012 (suite)

- **Energy Agreement 2008** (accord Parlement – Gouvernement)
 - dépassement objectifs Commission européenne de -0,6 MtCO₂éq/an (sur 54,8 Mt)
 - réduction de 2% de la consommation d'énergie primaire en 2011
 - 20% EP par ENR en 2011
 - ▶ augmentation des subventions aux nouvelles éoliennes
 - ▶ schéma de compensation financière pour le voisinage
 - ▶ aide au biogaz
 - ▶ accroissement de 400 MW de la puissance éolienne offshore
 - nouvelle législation pour faciliter l'essor des énergies renouvelables (**Renewable Energy Act**)
 - remplacement des chaudières au fioul individuelles par des pompes à chaleur haute performance
 - détaxation de l'hydrogène pour les véhicules électriques
 - création d'une Fondation de Recherche sur le véhicule électrique, l'énergie solaire, l'électricité houlomotrice
 - augmentation de la taxe carbone, création d'une taxe oxydes d'azote NO_x dès 2010
 - réduction cumulée de la consommation des nouveaux bâtiments d'au moins 25% en 2010, 2015 et 2020
- **Rapport Energinet.dk 2009**
 - **faisabilité technique d'injection > 50% électricité intermittente**
 - ▶ système énergétique intégré nécessaire
 - ▶ conversion d'énergie électrique en chaleur (pompes à chaleur, stockage thermique dans des réservoirs d'eau chaude DH)
 - ▶ utilisation des véhicules électriques
 - ▶ interconnexion réseau électrique NordPool

Skagen CHP district heating:

natural gas fired engines:

Electricity: 4.7 MW, efficiency: 41%

Heat 5.9 MW, efficiency: 52%

electric boiler:

Heat Capacity: 11 MW

natural gas boilers:

Boiler 1: 6.5 MW, 104%

Boiler 2: 9.8 MW, 98%

Boiler 3: 11.4 MW, 104%

Boiler 4: 9.85 MW, 98%

heat storage tank: 4,150 m³, heat capacity 250 MWh

annual heat deliverance 80,000 MWh

CHP engines annual production 24-30,000 MWh electricity



3. la planification démocratique du Danemark

3.5. le tournant décisif 2006-2012 (suite)

• La réglementation éolienne danoise au service du contrôle citoyen local

« Renewable Energy Act » en 2008

- ▶ encourage et finance l'investissement citoyen dans l'éolien, la propriété citoyenne des éoliennes et la rentabilité financière des projets éoliens
- ▶ transfère entièrement aux **communes** l'autorité de planification pour l'implantation des éoliennes terrestres, en conformité avec les objectifs nationaux
- ▶ assure l'**implication des citoyens**, des associations, des autorités locales et des acteurs économiques d'un bout à l'autre du processus
- ▶ oblige à ouvrir au moins 20% des parts des installations éoliennes prioritairement aux citoyens habitant à moins de 4,5 km ; n'importe quel citoyen des communes d'implantation peut également acheter des parts en seconde priorité (« *purchase option scheme* »)
- ▶ crée un **fond de garantie**, abondé par l'opérateur de transport électrique et les compagnies de distribution électrique à travers une obligation de service public
- ▶ permet de **soutenir la création de coopératives locales éoliennes** jusqu'à 66000 € par projet pour mener les études préliminaires
- ▶ **schéma vert** (« *green scheme* ») collecté par l'opérateur électrique finance la production éolienne auprès des municipalités à raison de 0,54 c€/kWh pendant les premières 22000 h de pleine charge
- ▶ **schéma de compensation** oblige les porteurs de projets à tenir des réunions publiques pendant la phase initiale, après laquelle des demandes de compensation peuvent être adressées à l'opérateur électrique pour d'éventuelles dépréciations des propriétés proches des éoliennes
- ▶ circulaire « *wind turbine circular* » :préconise le **regroupement des éoliennes** à des distances au moins égales à 4 fois leur hauteur et à au moins 4,5 km d'un autre groupe

3. la planification démocratique du Danemark

3.6. planifier la sortie des énergies fossiles

● Energy Agreement 2012

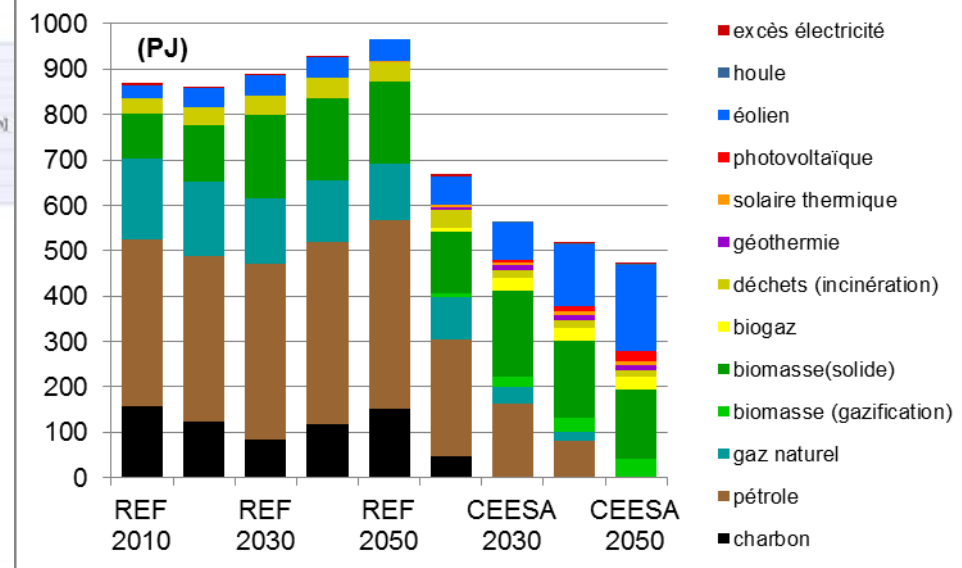
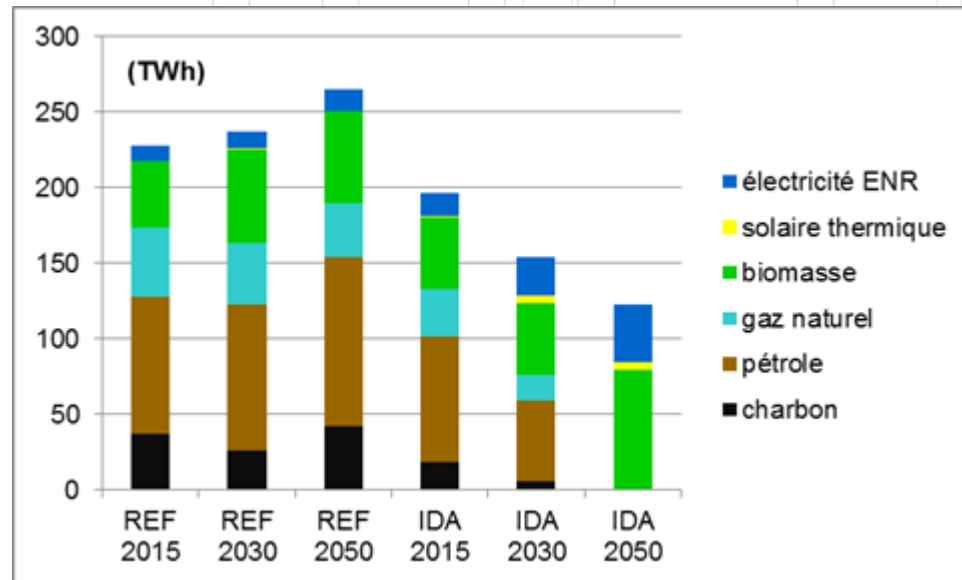
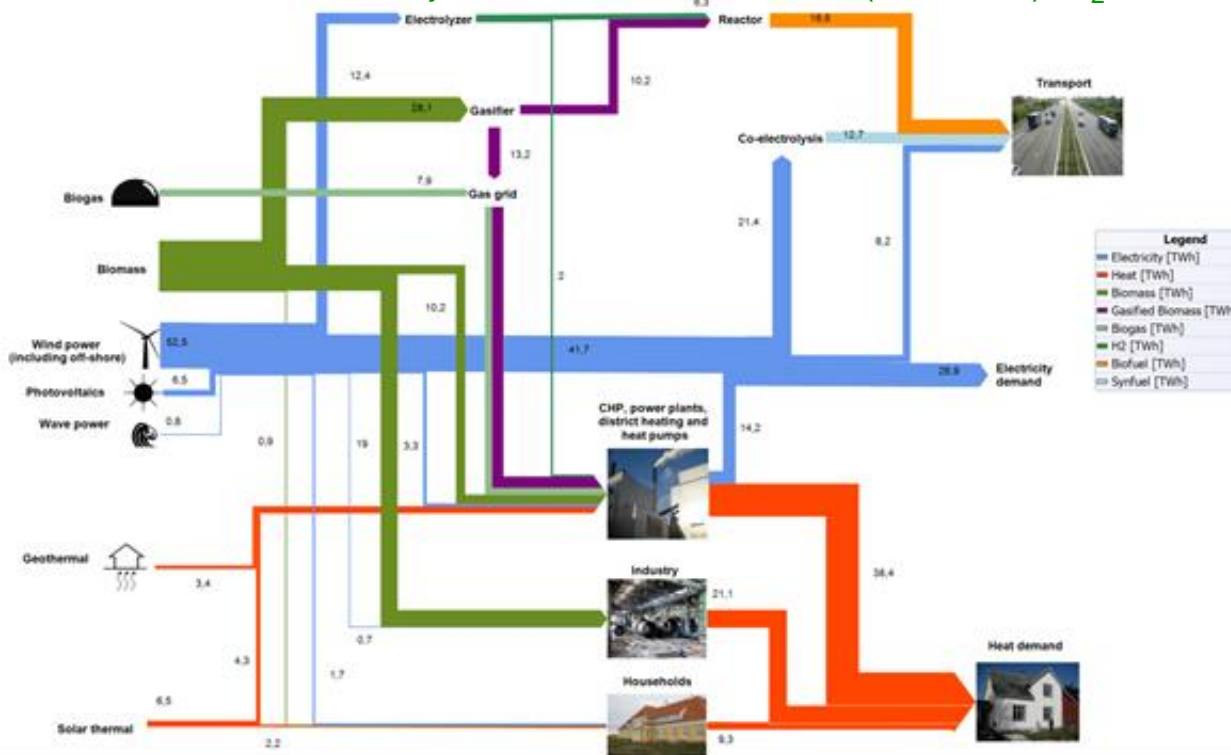
- accord Gouvernement social-démocrate-Parlement (Parti Conservateur, Alliance Vert-Rouge, Parti Libéral, Parti du Peuple Danois)
- chemin officiel vers une société entièrement libérée des énergies fossiles et nucléaire à l'horizon 2050
 - 35% de la consommation d'énergie finale couverte par les énergies renouvelables en 2020
 - 50% de la consommation électrique couverte par l'énergie éolienne en 2020
 - 100% de la consommation d'électricité et de chaleur couverte par les énergies renouvelables en 2035
 - 100% de l'approvisionnement énergétique danois assuré par les énergies renouvelables en 2050
 - 12% de réduction de consommation d'énergie primaire en 2020 par rapport à 2006
 - 34% de réduction des émissions de CO2 en 2020 par rapport à 1990
 - réduction de 7,6% de la consommation d'énergie finale en 2020 par rapport à 2010
 - installation de 600 MW offshore à Kriegers Flak et 400 MW offshore à Horns Rev avant 2020
 - 500 MW offshore supplémentaire près des côtes avant 2020
 - 1800 MW d'éolien terrestre supplémentaire avant 2020
 - introduction d'un plafonnement des subventions
 - investissement de 100 MDKK (1333,4 M€) dans un fond de développement et d'utilisation des nouvelles technologies de production énergétiques renouvelables (solaire, vagues, etc.), et de 25 MDKK (3,4 M€) dans les démonstrateurs d'énergie houlomotrice
 - conversion à la biomasse des centrales électriques au charbon
 - affectation de 35 MDKK (4,7 M€) à la géothermie et aux pompes à chaleur
 - interdiction des chaudières à fioul et gaz dans les nouveaux bâtiments à partir de 2013
 - interdiction des nouvelles chaudières fioul dans les bâtiments existants connectables aux réseaux de chaleur et de gaz à partir de 2016
 - investissement de 42 MDKK (5,6 M€) entre 2012 et 2015 dans un fond de conversion des chaudières fioul et gaz aux énergies renouvelables dans les bâtiments existants
 - subvention de 250 MDKK (33,5 M€) en 2013 puis 500 MDKK (67 M€) par an de 2014 à 2020 pour promouvoir l'usage efficace des énergies renouvelables dans les procédés industriels
 - fond de 30 MDKK (4 M€) par an entre 2013 et 2020 pour l'entretien et l'extension de la cogénération dans l'industrie et les serres
 - élaboration d'une stratégie d'installation des réseaux intelligents au Danemark
 - accord avec les compagnies électriques pour le développement de compteurs électriques à lecture horaire à distance
 - accroissement de 20% à 30% des subventions d'investissement dans les unités de cogénération au biogaz et création d'une force d'attaque pour le soutien aux projets de développement du biogaz
 - transports : introduction de 10% de biocarburants dans les carburants classiques ; préparation d'une stratégie globale de promotion des véhicules économes, dont subvention de 70 MDKK (9,4 M€) pour les stations de recharges de véhicules électriques et les infrastructures pour l'hydrogène et les infrastructures de GNV pour les poids lourds
 - affectation de 9,5 MDKK (1,3 M€) à l'élimination des usages des énergies fossiles sur l'île de Samsø
 - 35 recommandations pour l'installation des Smart Grids ; expérimentation sur l'île de Bornholm (cf. Smart Grid Danois).

3. la planification démocratique du Danemark

3.6. planifier la sortie des énergies fossiles (suite)

• scénarios 100% renouvelable 2050

- Plan IDA 2050 (2009)
- Projet CEESA (Coherent Energy and Environment System Analysis, Université Aalborg, 2009) ► -20% biomasse / IDA2050, SmartGrid
- éolien ≡ source majeure d'électricité, chaleur (PAC, eau), H₂



3. la planification démocratique du Danemark

3.7. modélisation des systèmes énergétiques EnergyPlan

▪ processus d'innovation créative

- collecte des propositions techniques
 - ▶ amélioration de l'efficacité énergétique et de la gestion de la demande
 - ▶ amélioration de l'efficacité de conversion/production des ENR
 - ▶ domaines : habitat, industrie, tertiaire, transports, agriculture
- données d'entrée dans EnergyPLAN

▪ méthodologie d'analyse

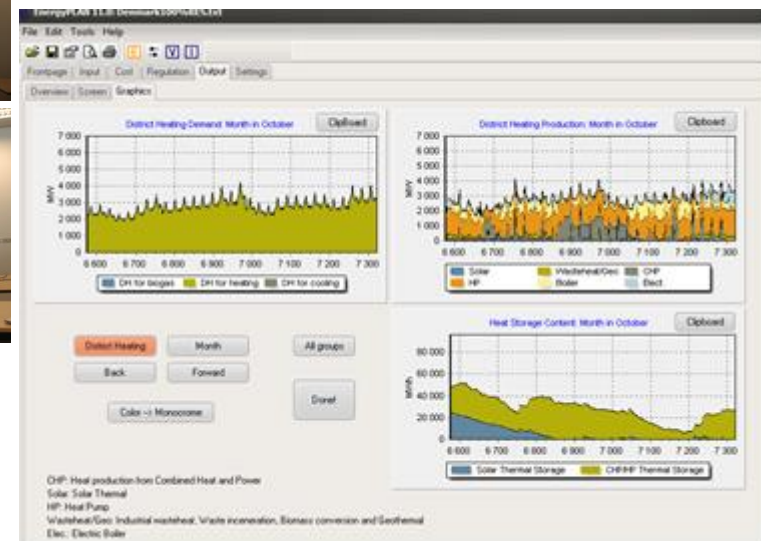
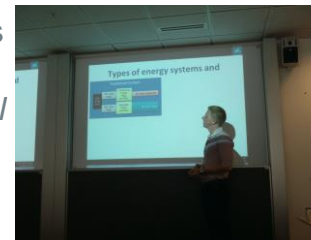
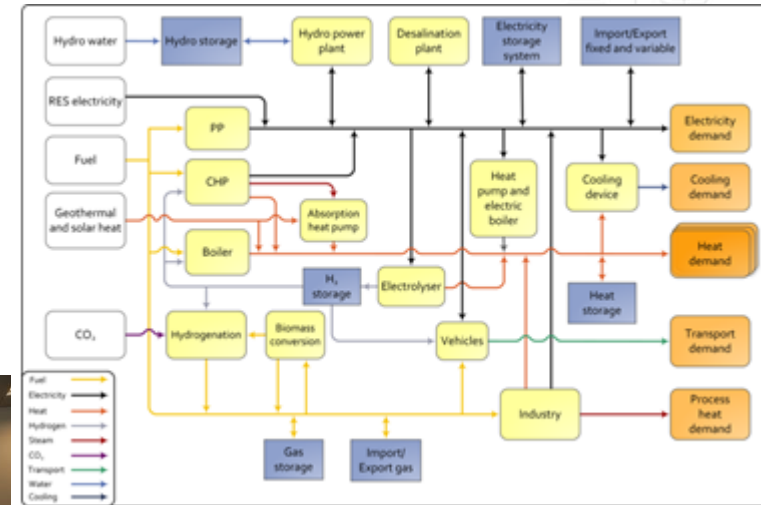
- simulation BAU complète du système danois à toutes échelles
- allers-retours entrées-sorties → maximisation de l'efficacité
- ➔ scénario brut alternatif non équilibré par secteur et besoin final
- ➔ faisabilité économique non assurée

▪ modèle d'analyse du système énergétique : 50% ENR en 2030

- simulation heure par heure EnergyPLAN (coûts, échanges, stockage, quotas CO2, etc)
- ▶ optimisation du système, équilibre demande/production

▪ processus de prolongement/innovation 100% ENR en 2050

- ▶ prise en compte des solutions énergétiques les plus efficaces
- ▶ efficacité prévisionnelle
- ▶ mise à jour permanente et optimale



3. la planification démocratique du Danemark

3.7. EnergyPlan (suite)

- Feuilles Entrée

habitat domestique

EnergyPLAN 9.0: thierry

File Edit Help

Frontpage Input Cost Regulation Output Settings

ElectricityDemand DistrictHeating RenewableEnergy ElecStorage Cooling Individual Industry Transport Waste Biomass Conversion

Heat supply and distributed generation from individual buildings

Distribution of heat demand: Hour_indv-heat-50percent.txt Distribution of solar thermal: Hour_SolarThermal_IndvDK.txt

TWh/year	Fuel Consumption		Efficiency Thermal	Heat Demand	Efficiency Electric	Capacity Limit **)	Electricity Production	Heat Storage *)	Solar Thermal		
	Input	Output							Share ***)	Input	Output
Coal boiler :	<input type="text" value="0"/>	0,00	<input type="text" value="0,8"/>	0,00				<input type="text" value="0"/>	<input type="text" value="0"/>	<input type="text" value="0"/>	0,00
Oil boiler :	<input type="text" value="0"/>	0,00	<input type="text" value="0,87"/>	0,00				<input type="text" value="20"/>	<input type="text" value="0,9"/>	<input type="text" value="0"/>	0,00
Ngas boiler :	<input type="text" value="0"/>	0,00	<input type="text" value="0,92"/>	0,00				<input type="text" value="20"/>	<input type="text" value="0,9"/>	<input type="text" value="0"/>	0,00
Biomass boiler :	<input type="text" value="2,72"/>	1,63	<input type="text" value="0,82"/>	2,23				<input type="text" value="20"/>	<input type="text" value="1"/>	<input type="text" value="0,89"/>	0,89
H2 micro CHP :		2,62	<input type="text" value="0,45"/>	<input type="text" value="1,97"/>	<input type="text" value="0,45"/>	<input type="text" value="1"/>	1,18	<input type="text" value="20"/>	<input type="text" value="1"/>	<input type="text" value="0,79"/>	0,79
Ngas micro CHP :		0,00	<input type="text" value="0,45"/>	<input type="text" value="0"/>	<input type="text" value="0,45"/>	<input type="text" value="0,5"/>	0,00	<input type="text" value="20"/>	<input type="text" value="1"/>	<input type="text" value="0"/>	0,00
Biomass micro CHP :		0,00	<input type="text" value="0,5"/>	<input type="text" value="0"/>	<input type="text" value="0,3"/>	<input type="text" value="1"/>	0,00	<input type="text" value="0"/>	<input type="text" value="1"/>	<input type="text" value="0"/>	0,00
Heat Pump :				<input type="text" value="2,23"/>	<input type="text" value="3"/>	<input type="text" value="0,48"/>	-0,53	<input type="text" value="20"/>	<input type="text" value="1"/>	<input type="text" value="0,89"/>	0,89
Electric heating :				<input type="text" value="0"/>			0,00	<input type="text" value="0"/>	<input type="text" value="1"/>	<input type="text" value="0"/>	0,00
Total :		4,26		6,43			0,65				2,57

*) The capacity of the heat storage is given in days of average heat demand
 **) The capacity limit of the CHP and HP is given in share (between 0 and 1) of maximum heat demand
 ***) Share of heat consumers with solar thermal

Not active When active the Heat Pump heat storage is only used for space heating and not hot water (defined by min distr. value)

3. la planification démocratique du Danemark

3.7. EnergyPlan (suite)

- Feuilles Entrée

chauffage urbain

EnergyPLAN 9.0: thiery

File Edit Help

Frontpage Input Cost Regulation Output Settings

ElectricityDemand **DistrictHeating** RenewableEnergy ElecStorage Cooling Individual Industry Transport Waste Biomass Conversion

CHP, Heat Pumps and Boilers at District Heating Systems:

In common for all three district heating groups :

Distribution of demand : Hour_distr-heat-2-50percent.txt

Distribution of solar thermal :

Sum of district heating demand : 25,96 TWh/year

Sum of solar thermal : 2,71 TWh/year

Group I : District heating gr. I is meant to represent DH systems without CHP

Demand : TWh/year Production Storage Loss *) Share **) Result
 TWh/year TWh/year GWh Percent TWh/year

DHP efficiency: Solar thermal: 0,76

Group II : District heating gr. II is meant to represent DH systems based on small CHP plants

Demand : TWh/year Solar thermal: 1,53

	Capacities		Efficiencies			Heat storage gr. 2 GWh
	MW-e	MJ/s	elec.	Therm.	COP	
CHP	<input type="text" value="1200"/>	<input type="text" value="800"/>	<input type="text" value="0.54"/>	<input type="text" value="0.36"/>		<input type="text" value="40"/>
Heat Pump	<input type="text" value="200"/>	<input type="text" value="700"/>			<input type="text" value="3.5"/>	
Boiler		<input type="text" value="4800"/>		<input type="text" value="0.9"/>		<input type="text" value="2.5"/> Per cent

Group III : District heating gr. III is meant to represent DH systems based on large CHP extraction plants

Demand : TWh/year Solar thermal: 0,42

	Capacities		Efficiencies			Heat storage gr. 3 GWh
	MW-e	MJ/s	elec.	Therm.	COP	
CHP	<input type="text" value="2000"/>	<input type="text" value="812"/>	<input type="text" value="0.64"/>	<input type="text" value="0.26"/>		<input type="text" value="40"/>
Heat Pump	<input type="text" value="300"/>	<input type="text" value="1050"/>			<input type="text" value="3.5"/>	
Boiler		<input type="text" value="7300"/>		<input type="text" value="0.9"/>		<input type="text" value="1"/> Per cent
Condensing	<input type="text" value="8000"/>		<input type="text" value="0.64"/>			
PP2	<input type="text" value="0"/>		<input type="text" value="0.45"/>			

CHP extraction plants are modelled as a combination of CHP back pressure and condensing plants

*) Loss in percent of storage content

**) Share of district heating demand with solar thermal

Distribution of fuel (TWh/year)	Coal	Oil	Ngas	Biomass
	Variable	Variable	Variable	Variable
DHP	<input type="text" value="0"/>	<input type="text" value="0"/>	<input type="text" value="0"/>	<input type="text" value="0.46"/>
CHP2	<input type="text" value="0"/>	<input type="text" value="0"/>	<input type="text" value="0"/>	<input type="text" value="3.25"/>
CHP3	<input type="text" value="0"/>	<input type="text" value="0"/>	<input type="text" value="0"/>	<input type="text" value="6.88"/>
Boiler2	<input type="text" value="0"/>	<input type="text" value="0"/>	<input type="text" value="0"/>	<input type="text" value="1.29"/>
Boiler3	<input type="text" value="0"/>	<input type="text" value="0"/>	<input type="text" value="0"/>	<input type="text" value="1.11"/>
PP	<input type="text" value="0"/>	<input type="text" value="0"/>	<input type="text" value="0"/>	<input type="text" value="0.42"/>
PP2	<input type="text" value="0"/>	<input type="text" value="0"/>	<input type="text" value="0"/>	<input type="text" value="0"/>

3. la planification démocratique du Danemark

3.7. EnergyPlan (suite)

- Feuilles Coûts et taxes par source d'énergie

EnergyPLAN 9.0: thierry

File Edit Help

Frontpage Input Cost Regulation Output Settings

Fuel Operation Investment Additional

Fuel, Taxes and CO2 costs

	Coal	FuelOil	Diesel Gasoil	Petrol/JP	Ngas	LPG	Waste	Biomass	Dry Biomass	Wet Biomass
Fuel Price (world market prices) (EUR/GJ)	15,2	49,2	87,9	93,5	47,5	0	+ 0	22	0	0
Fuel handling costs (distribution and refinery) (EUR/GJ)										
To Biomass Conversion Plants								0	0	0
To central CHP and power stations	0,5	1,7			3,1		0	11,8		
To dec. CHP, DH and Industry	0	13,7			6,4		0	7,9		
To Individual house holds	0		20,9		16			67		
To transportation (road and train)			22,6	30,5	0			11,8		
To transportation (air)				5						
Taxes (EUR/GJ)										
Individual households	0		60		0			0		
Industry	0	0			0		0	0		
Boilers (at CHP and DH plants)	69	60			56		0	0		
CHP units	17	24			22		0	0		
Compressed Air Energy Storage (CAES)					0					
CO2 content in th fuels:	95	74			56,7	0	0			(kg/GJ)
CO2 Price (included in marginal production prices)	150		(EUR/t CO2)							
Fuel price alternative :	Basic									

Taxes on electricity for energy conversion :

(EUR/MWh)	DH systems	Individual houses
Electric heating	162	600
Heat Pumps	567	600
Electrolysers	0	0
Electric cars		0
Pump (storage)	0	

Business economic operation:
All costs (fuel, handling and taxes) are included in the marginal costs when optimal operation strategies for the individual plants are decided.

Socio economic consequences:
Taxes are not included when the socio economic consequences are calculated.

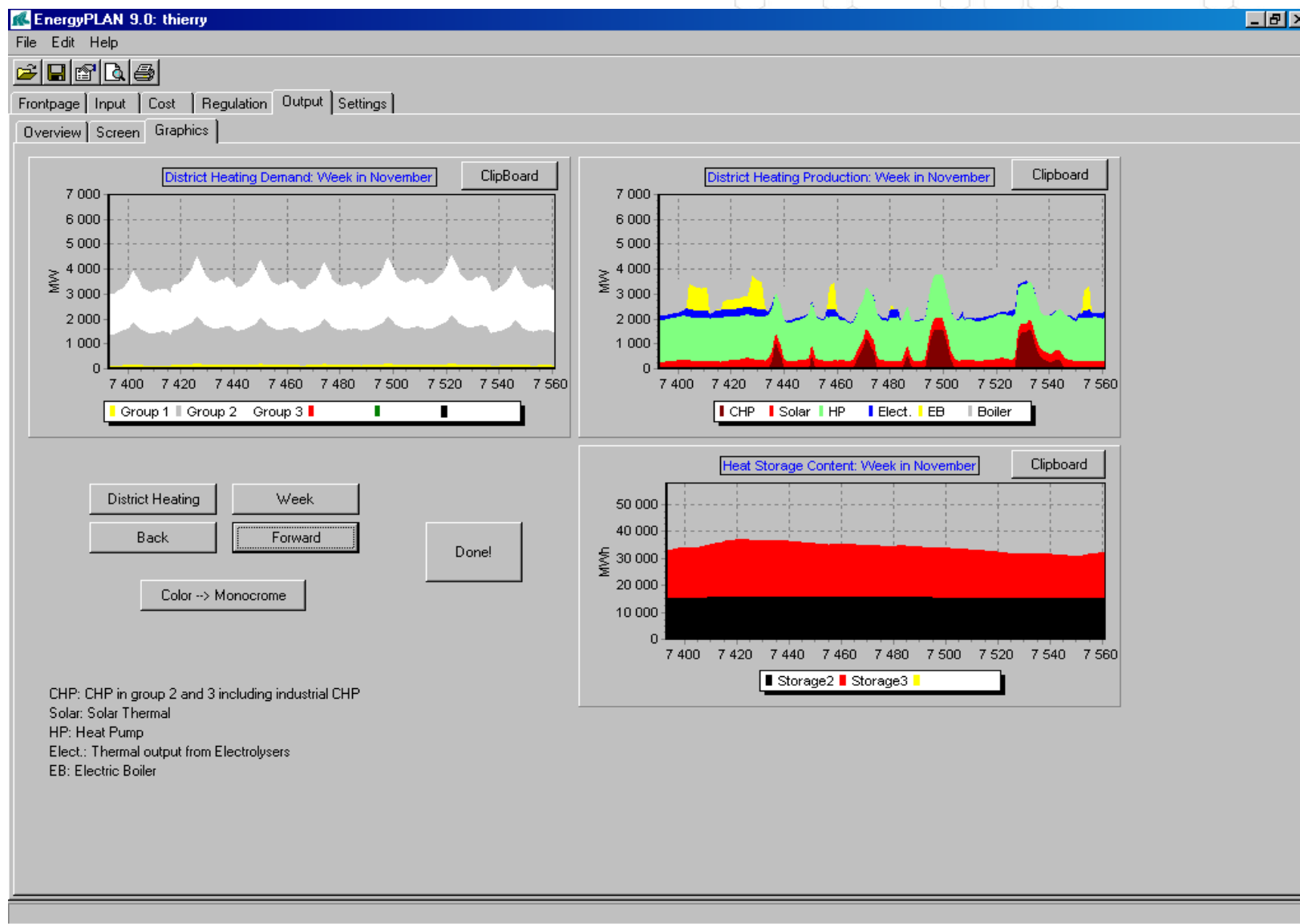
Biomass: E.g. straw and wood incl. pellets
Dry Biomass: Green energy crops for Biomass conversion
Wet Biomass: E.g manure etc. for biogas production

3. la planification démocratique du Danemark

3.7. EnergyPlan (suite)

- Feuilles Sorties

- heure par heure
- mensuelle
- par énergie finale
- état des stocks



3. la planification démocratique du Danemark

3.7. EnergyPlan (suite)

- feuille EnergyPLAN (plan IDA 2050)

Input										IDA2050										The EnergyPLAN model 7.20										
Electricity demand (TWh/year):					Flexible demand					Capacities					Efficiencies					Regulation Strategy: Technical regulation no. 3					Fuel Price level:					
Fixed demand 26,40					Fixed Imp/exp. 0,00					MW-e MJ/s elec. Ther COP					KEOL regulation 23450					Minimum Stabilisation share 0,00					Capacities Storage Efficiencies					
Electric heating 0,00					Transportation 0,00					Heat Pump 150 525					Stabilisation share of CHP 0,00					Hydro Pump: 0 0 0,85										
Electric cooling 0,00					Total 31,10					Boiler 3484 0,95					Minimum CHP gr 3 load 0 MW					Electrol. Gr.2: 200 34 0,69 0,07										
District heating (TWh/year)					Gr.1 Gr.2 Gr.3 Sum					Group 3: CHP 2500 1016 0,64 0,26					Heat Pump maximum share 0,50					Electrol. Gr.3: 400 67 0,69 0,07										
District heating demand 2,95 13,49 24,34 40,79					Solar Thermal 1,25 1,39 0,61 3,33					Heat Pump 300 1050					Maximum import/export 0 MW					Electrol. trans.: 564 63 0,68										
Industrial CHP (CSHP) 0,00 0,00 2,65 2,65					Demand after solar and CSHP 1,71 12,10 21,08 34,81					Condensing 10333 0,64					Distr. Name : Price_DKKV_2008.bt					Ely. MicroCHP: 0 0 0,73										
Wind 4454 MW 12,63 TWh/year 0,00 Grid					Offshore Wind 4625 MW 18,98 TWh/year 0,00 stabili-					Heatstorage: gr.2: 40 GWh gr.3: 10 GWh					Addition factor 90,00 DKK/MWh					(TWh/year) Coal Oil Ngas Biomass										
Photo Voltaic 3415 MW 4,5 TWh/year 0,00 salion					Wave Power 700 MW 2,47 TWh/year 0,00 share					Fixed Boiler: gr.2: 2,5 Per cent gr.3: 1,0 Per cent					Multiplication factor 0,97					Transport 0,00 0,00 0,00 20,84										
Hydro Power 0 MW 0 TWh/year					Geothermal 0 MW 0 TWh/year					Electricity prod. from CSHP Waste (TWh/year)					Dependency factor 0,02 DKK/MWh pr. MW					Household 0,00 0,00 0,00 1,07										
										Gr.1: 0,00 0,00					Average Market Price 497 DKK/MWh					Industry 0,00 0,00 0,00 23,61										
										Gr.2: 0,00 0,99										Various 0,00 0,00 0,00 0,00										
										Gr.3: 1,19 1,98																				
Output																														
District Heating										Electricity										Exchange										
Demand					Production					Consumption					Production					Balance					Payment					
Distr. heating MW	Solar MW	Waste+ CSHP MW	DHP MW	CHP MW	HP MW	ELT MW	Boiler MW	EH MW	Ba- lance MW	Elec. demand MW	Flexi- ble MW	HP MW	Elec- trolyser MW	EH MW	Hydro Pump MW	Tur- bine MW	RES MW	Hy- dro MW	Geo- thermal MW	Waste+ CSHP MW	CHP MW	PP MW	Stab- Load %	Imp MW	Exp MW	CEEP MW	EEP MW	Imp	Exp	
January	6950	147	1478	446	942	1572	15	2351	0	3654	293	866	755	0	0	0	3679	0	0	431	1824	56	100	0	0	0	0	0	0	0
February	7091	309	1478	391	505	1572	25	2810	0	3615	302	871	888	0	0	0	5215	0	0	431	979	6	100	0	0	0	0	0	0	0
March	6167	350	1478	308	499	1572	22	1938	0	3480	327	709	855	0	0	0	4613	0	0	431	990	0	100	0	0	0	0	0	0	0
April	5112	529	1478	170	368	1498	21	1050	0	-2	3066	309	593	873	0	0	4246	0	0	431	741	4	100	0	0	0	0	0	0	0
May	4197	587	1478	63	316	1422	16	280	0	35	2992	316	522	875	0	0	4574	0	0	431	626	6	100	0	0	0	0	0	0	0
June	2370	471	1458	17	123	331	5	6	0	-42	2908	297	140	914	0	0	4582	0	0	435	232	119	100	0	0	0	0	0	0	0
July	2370	512	1454	17	171	220	4	2	0	-12	2651	326	93	777	0	0	3593	0	0	436	339	294	100	0	0	0	0	0	0	0
August	2370	485	1456	17	169	249	5	4	0	-15	3050	288	106	834	0	0	3892	0	0	436	327	490	100	0	0	0	0	0	0	0
September	3180	458	1478	23	370	848	7	21	0	-24	3130	302	321	833	0	0	4012	0	0	431	727	131	100	0	0	0	0	0	0	0
October	4317	320	1478	150	251	1486	24	481	97	31	3247	319	567	948	97	0	5525	0	0	431	493	7	100	0	170	170	0	0	0	
November	5398	166	1478	325	410	1546	27	1253	192	1	3509	278	650	921	192	0	5141	0	0	431	813	3	100	0	165	165	0	0	0	
December	6277	99	1478	416	844	1544	14	1881	0	1	3510	329	775	741	0	0	3695	0	0	431	1653	19	100	0	0	0	0	0	0	0
Average	4644	369	1473	195	415	1154	15	1001	24	-2	3233	307	517	851	24	0	4392	0	0	432	813	95	100	0	28	28	0	0	0	Average price (DKK/MWh)
Maximum	11516	2901	1478	836	2312	1575	45	6149	1200	1056	4986	2500	1981	1164	1200	0	12046	0	0	473	4445	2679	100	0	2923	2923	0	0	0	593
Minimum	2182	0	1278	16	0	66	0	0	0	-1449	1620	0	19	554	0	0	34	0	0	431	0	0	100	0	0	0	0	0	0	0
Total for the whole year																														
TWh/year	40,79	3,24	12,94	1,71	3,64	10,13	0,13	8,79	0,21	-0,02	28,40	2,70	4,54	7,47	0,21	0,00	0,00	38,58	0,00	0,00	3,80	7,14	0,84	0,00	0,25	0,25	0,00	0,00	0,00	0,00
FUEL BALANCE (TWh/year):																														
	DHP	CHP2	CHP3	Boiler2	Boiler3	PP	Geo-th.	Hydro	Elec.ly.s	Waste	CAES	Wind	Offsh.	PV	Wave	Solar.Th	Transp.	househ.	Industry	Various	Total	Imp/Exp	Corrected Imp/Exp	Netto	CO2 emission (Mt):					
Coal	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	
Oil	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	
N.Gas	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	
Biomass	1,81	5,09	6,11	3,50	4,78	1,31	-	-	-	11,09	-	-	-	-	-	-	20,84	0,87	23,61	-	79,00	-0,38	78,61	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	
Renewable	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	12,63	18,98	4,50	2,47	5,29	-	-	-	-	43,86	0,00	43,86	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	
H2 etc.	-	0,17	0,62	0,35	0,66	-	-	-	-5,10	-	-	-	-	-	-	-	3,29	-	-	-	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	
Geothermal	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	
Total	1,81	5,26	6,72	3,85	5,44	1,31	-	-	-5,10	11,09	-	12,63	18,98	4,50	2,47	5,29	24,13	0,87	23,61	-	122,86	-0,38	122,48	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	

22-februar-2010 [09:46]

4. vers le Smart Energy System danois



4.1. Le SmartGrid électrique

• mise en place des Smart Grids électriques

- île de Bornholm : pilote expérimental
- projet « **Bright Green Island** » : libérer l'île de toute énergie fossile et de la rendre autonome en énergies renouvelables d'ici 2025
 - ▶ porteurs: entreprises locales et internationales, DTU (Université Technique du Danemark, Energinet.dk, UE
 - ▶ construction et gestion du premier réseau électrique intelligent
 - ▶ fonctionnement en mode isolé et/ou interconnecté
 - résoudre les problèmes posés par les ruptures fréquentes du câble électrique sous-marin la reliant à la Suède par le passage des bateaux.
- 21 M€ sur 4 ans (**EcoGrid-EU**)
- **intégration massive des productions éoliennes et photovoltaïques**
 - ▶ 2009 : éolien 40% → 2013 : éolien 64%, PV 1%, biomasse 10%
 - ▶ réseau intelligent connecté aux compteurs intelligents qui assurent le report à distance des consommations de 2000 foyers
- **côté production**: Smart Grid 60 kV-10 kV-0,4 kV; 36 MW éolien; 2 MW PV; 2 MW biogaz, 5 unités CHP biomasse 16 MW → pointes 55 MW
- **côté demande**: centres de stockage électrochimiques aux nœuds du réseau, voitures électriques, pompes à chaleur, réfrigérateurs, micro-CHP, stock thermique de 5 réseaux de chaleur

• retour d'expérience EcoGrid-EU

- ▶ injection massive 100% d'énergies renouvelables ⇒ mise en place Smart Energy System {SmartGrids électricité + chaleur + froid + gaz avec unités de stockage} + stratégie globale d'économie d'énergie et d'amélioration de l'efficacité énergétique
- ▶ évite le recours à des centrales d'appoint coûteuses



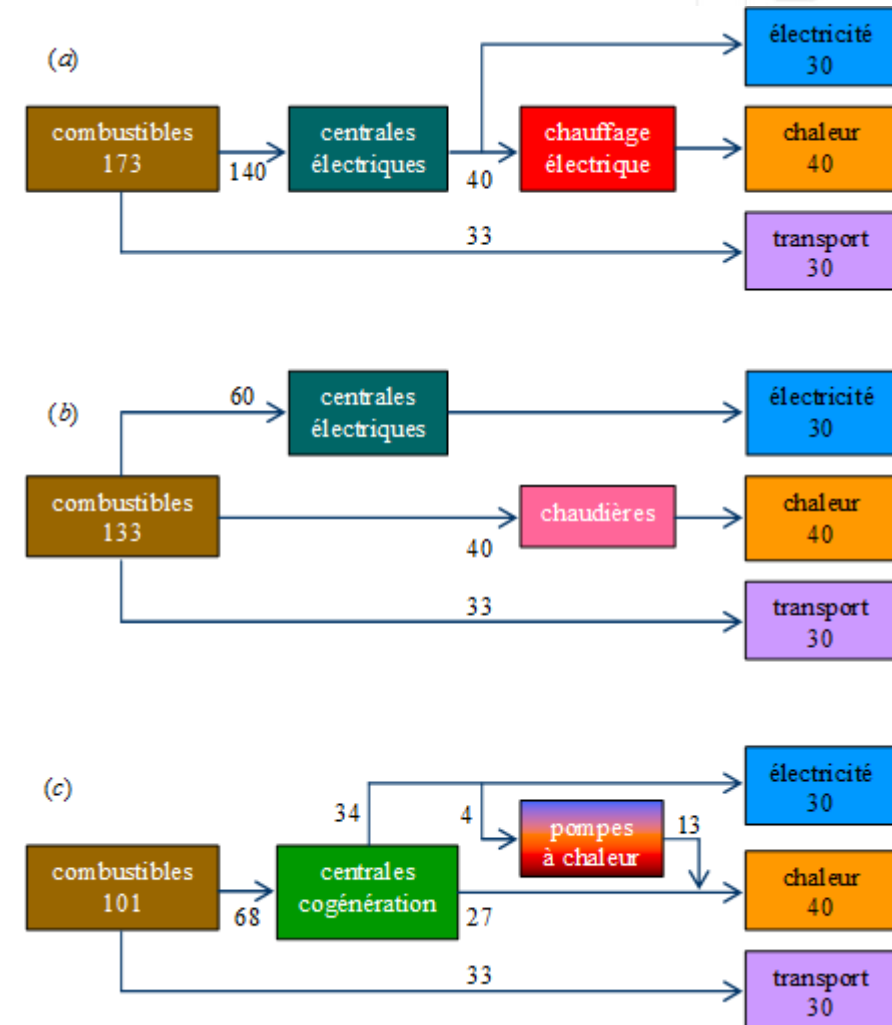
réplique du centre de contrôle du Smart Grid de Bornholm au DTU de Lyngby près de Copenhague (photo DTU)

4. vers le Smart Energy System danois

4.2. du SmartGrid au Smart Energy System

● architecture des Smart Energy Systems

- phase d'intégration des EnR: généralisation grandes PAC dans les CHP + batteries fixes dans des installations auxiliaires de stabilisation du réseau
- injection massive des EnR (>50%) : implantation électrolyseurs → H₂ → conversion en combustibles stockables (mais pas pour la production d'électricité, chère et peu efficace)
- réseaux de chaleur → grande partie des besoins en chauffage selon la répartition de l'habitat des pays et régions (entre 36 et 73% au Danemark)
- réduction de la demande de chaleur d'environ 50% en Europe
- au-delà de 50% d'EnR: véhicules électriques et hybrides efficaces → moitié des transports (efficacité PEMFC insuffisante)
- transports: 50 % électricité renouvelable, 50% combustibles renouvelables écologiques issus du H₂ électrolyse, du recyclage de CO₂ issu des CHP et DH, de la gazéification de biomasse, etc.
- unités de production électrique décentralisée non intermittente et ajustable (cycles combinés en cogénération turbine à gaz – turbine à vapeur de haut rendement, piles à combustibles SOFC: 10-20% de la production électrique)
- réseau de gaz naturel → rôle-clé dans la période de transition énergétique
 - ▶ injection biogaz + méthane de méthanation H₂ + CO₂ (avec récupération annexe de chaleur dans les réseaux de chaleur)

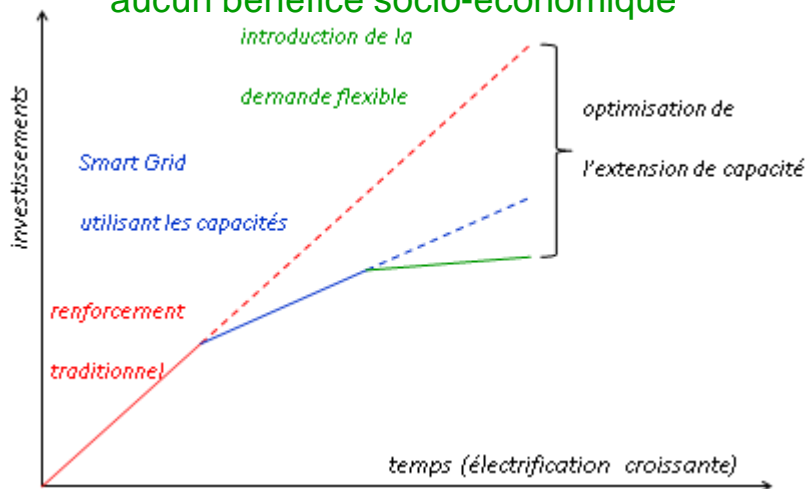


4. vers le Smart Energy System danois

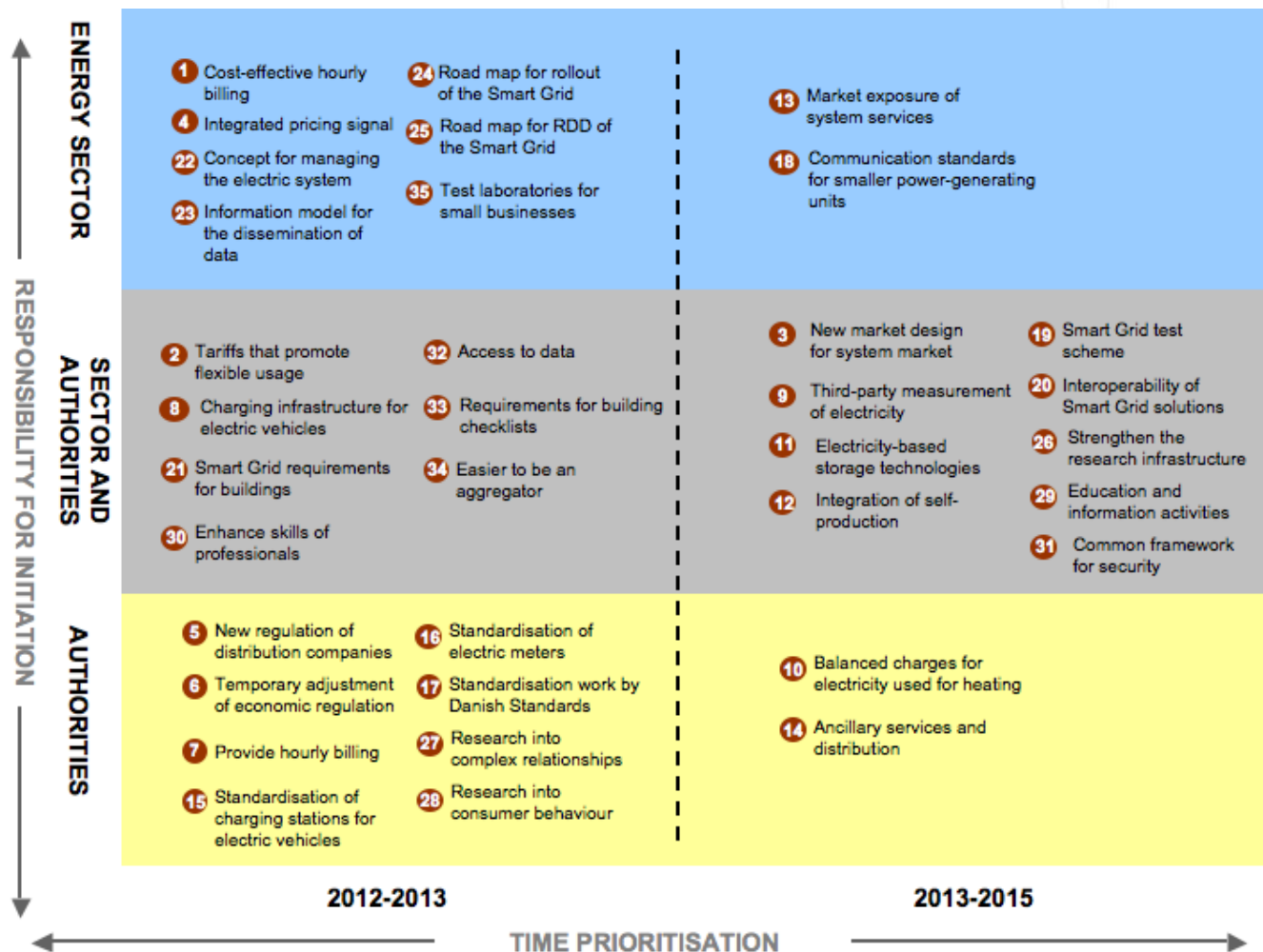
4.2. du SmartGrid au Smart Energy System (suite)

• Smart Grid Network danois

- 9 recommandations-clés
- 35 recommandations partielles spécifiques
- coût brut du Smart Grid 2025 : 1,3 G€
- coût net : 0,21 G€ (bénéfices socio-économiques attendus)
- extension réseau traditionnel: 1,03 G€ sans aucun bénéfice socio-économique



recommandation 2: – l'installation précoce du Smart Grid réduit les investissements

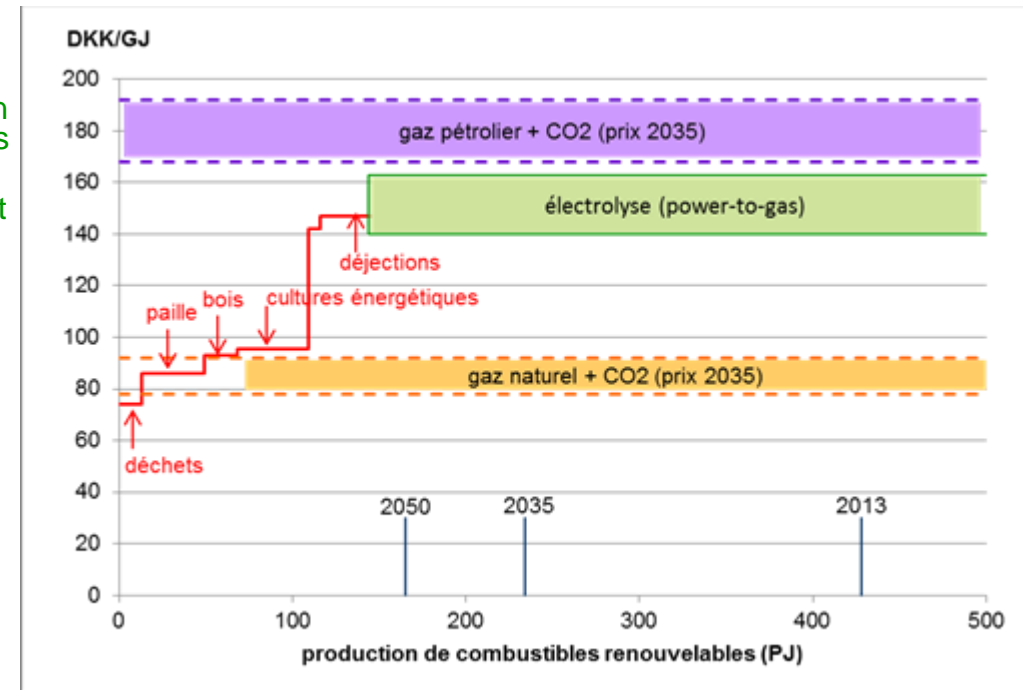


4. vers le Smart Energy System danois

4.3. le Smart Energy System danois

● mise en place du Smart Energy System : *Concept Energy 2030* (Energinet.dk)

- conception du SES pour atteindre 100% ENR
- réduction 15 à 25% des nouvelles capacités éoliennes sans utilisation supplémentaire de biomasse (potentiel éolien onshore > 3,5 GW sans offshore supplémentaire)
- combiner flexibilité de consommation électrique (report automatisé) et intégration au marché international à plus de 500 km (réduire de 25 à 35% les besoins en capacités d'appoint)
- transition progressive de la biomasse et des déchets vers la production de carburants + forte réduction des consommations de carburants entre 2013 et 2035 puis 2050 par le biais de l'électricité
- minimisation des CHP à biomasse et déchets utilisées en base
- remplacement des chaudières par des PAC, y compris chauffages industriels
- utilisation de la chaleur de gazéification de la biomasse et des installations d'électrolyse power-to-gas (SOEC/SOFC) pour le procédés industriels de haute température
- utilisation directe du biogaz dans des réseaux locaux de gaz renouvelables {biogaz, H₂, gaz de synthèse} connectés au réseau de gaz naturel sans le transformer en méthane
- combinaison {cogénération CHP + pompes à chaleur + stockage thermique} → découplage prix de l'électricité / prix de la chaleur
- expansion de l'éolien terrestre au Danemark (×3 à 5 fois) :
l'éolien est l'énergie la plus compétitive aujourd'hui au Danemark (éolien onshore : 44 €/MWh ; éolien offshore : 80 €/MWh ; photovoltaïque : 78 €/MWh ; CHP bois : 106 €/MWh ; CHP charbon : 77 €/MWh ; CHP gaz naturel : 81 €/MWh)



coûts moyens d'investissement à long terme de production de combustibles renouvelables au Danemark

(*) LCOE

The Danish energy model – Innovative, Efficient and Sustainable, Danish Energy Agency (2015)

5. conclusions



5.1. vers une révolution renouvelable

■ les transitions énergétiques sont déjà en cours:

- ▶ **Danemark** → **2014**: production électricité 57,4% renouvelable (dont 42,7% éolien)
→ **2020**: consommation électrique 50% éolienne, énergie finale 35% renouvelable
→ **2035**: consommation d'électricité et de chaleur 100% renouvelable
→ **2050**: 100% des besoins énergétiques du Danemark couverts par les énergies renouvelables
- ▶ **France** → **système 100% renouvelable possible**, techniquement faisable, politiquement et économiquement souhaitable (Ademe, Negawatt)
→ **seule** une transition massive et planifiée de sortie des fossiles et du nucléaire vers une structure énergétique 100% renouvelable peut permettre à la France de développer son potentiel scientifique et industriel, de développer massivement son économie, sortir du chômage structurel, garantir son indépendance politique et énergétique, préserver sa qualité de vie

■ les énergies renouvelables sont la solution:

- ▶ au réchauffement climatique
- ▶ à l'indépendance énergétique des pays européens, mais aussi africains, asiatiques, américains
- ▶ aux atteintes environnementales et écologiques
- ▶ aux inégalités internationales
- ▶ au chômage
- ▶ aux atteintes à la démocratie
- ▶ à l'épuisement des ressources géologiques et agricoles
- ▶ aux déficits économiques des pays dus aux importations fossiles et nucléaires
- ▶ à la prolifération nucléaire

■ les acteurs de l'énergie seront les citoyens (communes, collectivités locales, coopératives, individus)

5. conclusions



5.2. pour une planification énergétique soutenable

☐ mesures horizon 2030

▪ économie d'énergie et de matières premières

- isolation thermique des anciens bâtiments
- diminution des limites de vitesse autorisées (120/100/85)
- collecte et recyclage obligatoire des matériels
- limitation des transports individuels urbains
- division par 4 de l'éclairage public, commercial, industriel
- élimination véhicules > 120 g/km

▪ sobriété énergétique

- obligation architecture passive (nouveaux bâtiments)
- normes énergétiques contraignantes (ordinateurs, réfrigérateurs, etc.)
- développement transports en commun
- développement des transports doux (piétons, vélos, rollers, petit électrique)
- développement agriculture & alimentation bio et végétarienne (restauration collective, amap, etc.)

▪ efficacité énergétique

- interdiction chauffage électrique
- éclairage led blanches, écrans oled obligatoires
- remplacement moteurs et ventilateurs électriques
- développement véhicules électriques sobres (urbains, interurbains)
- développement massif des réseaux électriques décentralisés intelligents
- développement massif de la cogénération, micro-cogénération, réseaux de chaleur
- remplacement des PAC, réfrigérateurs, climatiseurs à compression par machines magnétocaloriques

▪ développement massif des énergies renouvelables

▪ sortie progressive du nucléaire

- 365 TWh (2009) → 0 (2033) (France)

- ▶ retours d'expérience
- ▶ réseaux des villes soutenables 100% ENR
- ▶ planification démocratique étendue à l'Europe
- ▶ programme européen interuniversitaire ENR 100%

5. conclusions



5.2. pour une planification énergétique soutenable (suite)

▣ pistes horizon 2050

- ▶ couplage des réseaux intelligents combinés électricité – chaleur – froid – gaz (Smart Energy Systems européens)
- ▶ généralisation des réseaux de biogaz, d'hydrogène (*électrolyse, power-to-gas*)
- ▶ généralisation stockage électrique/cogénération (gravitationnel, chimique: piles à combustibles PEMFC, SOFC, batteries)
- ▶ développement du stockage thermique solaire intersaisonnier (géothermie profonde + cogénération)
- ▶ développement des technologies renouvelables marines (houlomotrice, thermique, marémotrice, éoliennes flottantes, osmotique)
- ▶ généralisation de la *décarbonation* des hydrocarbures + biométhane + bois
- ▶ développement des interconnexions européennes (réseaux électriques, hydrogène, biogaz)
- ▶ achèvement de la couverture énergétique renouvelable
- ▶ généralisation des technologies biologiques renouvelables (micro-algues, cyanobactéries, biométhane)
- ▶ développement massif des aires de biodiversité
- ▶ développement des transports internationaux renouvelables (avions, trains, bateaux)
- ▶ développement massif des techniques quantiques (captation photovoltaïque, ordinateurs opto-moléculaires, transmission par fibres optiques)

5. conclusions



Merci pour votre attention