



Méthodologie scientifique et philosophie de la planification énergétique

Retours d'expérience du Danemark

Thierry de Larochelambert

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



-
1. présentation
 2. méthodologie de la planification danoise
 3. retours d'expérience du Danemark
 4. structure et analyse des SERI

1. présentation

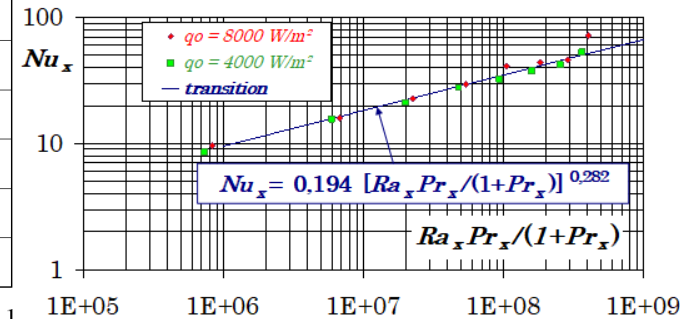
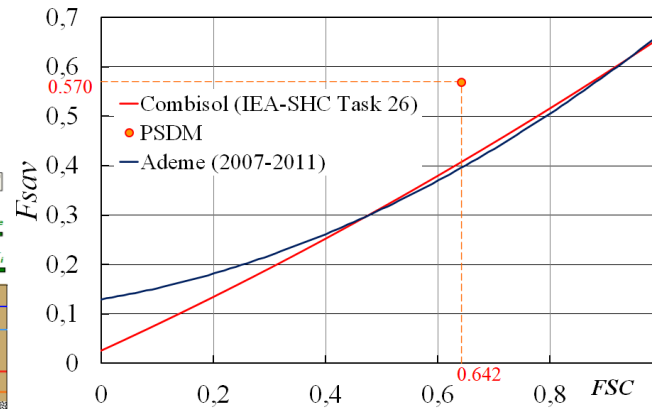
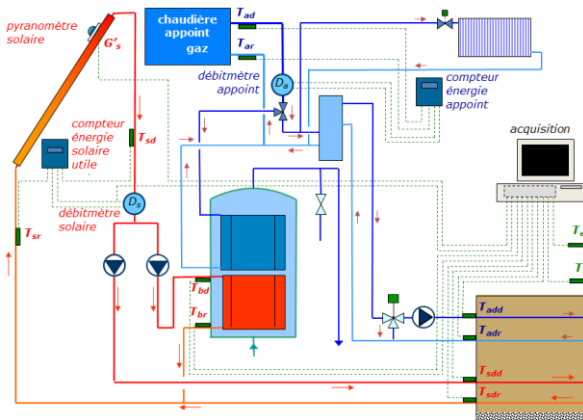
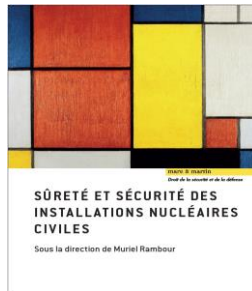
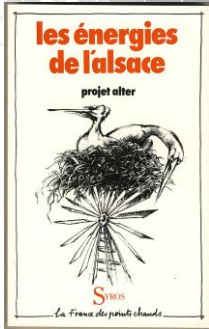
Activité professionnelle

- ❑ Agrégation de Physique & Chimie (1987)
- ❑ Chaire Supérieure de Physique & Chimie (1999)
- ❑ Doctorat en Energétique de l'Université de Haute-Alsace (1997)
- ❑ Professeur et Chercheur émérite associé à l'**Institut FEMTO-ST, D^{pt} Energie** (depuis 2007)
- ❑ Responsable du Pôle Magnétocalorique du Dpt Energie, FEMTO-ST (depuis 2015)
- ❑ Professeur Associé, Chercheur au **Laboratoire Gestion des Risques et Environnement** - UHA (1997-2007)
- ❑ Cofondateur de l'association **Projet Alter Alsace – Alter Alsace Energies** (1980)
- ❑ Membre permanent de l'association **Global Chance** (expertise Climat-Energie)
- ❑ Expert à la Convention Citoyenne pour le Climat (2020)
- ❑ Expert à la **MIE Géothermie Profonde** de l'Eurométropole Strasbourg (2021)
- ❑ Membre contributeur actif de la **SFEC** – stratégie française énergie climat) (2022)

1. présentation

Principaux travaux de recherche (physique, énergie)

- ❑ Projet de **chauffage urbain géothermique** de Lutterbach (1980-1986)
- ❑ Calcul de **scénarios énergétiques régionaux 100% EnR / 2050** (1980-2022)
- ❑ Conception, réalisation, modélisation du **Plancher Solaire Direct Mixte** en bâtiment bioclimatique (1990-2022)
- ❑ Analyse des **politiques et des transitions énergétiques européennes vers les systèmes 100% EnR** (2010-2022)
- ❑ Étude des **Systèmes Énergétiques Renouvelables Intelligents** (couplages, stockages, conversions) (2016-2022)
- ❑ Étude de la **transition turbulente de couches limites en convection naturelle sur parois fortement chauffées** (1990-2022)
- ❑ Conception de la méthode thermo-anémométrique **SWICTA** (Sliding Window Cross-correlation Thermo-Anemometry) (2000)
- ❑ Métrologie de l'**effet magnétocalorique** et développement de **machines de réfrigération magnétique** (2008-2022)
- ❑ Modélisation des **phénomènes critiques** et **exposants critiques** (magnétisme, turbulence, etc.) (2008-2022)
- ❑ Métrologie des **propriétés thermo-physiques des matériaux magnétocaloriques** (2014-2022)
- ❑ Étude des **écoulements alternés** (modélisation des transferts de chaleur et de matière) (2014-2022)
- ❑ **Analyses de sûreté nucléaire** (déchets, matériaux, GV, cuves, réacteurs, Gen III, Gen IV, fusion) (2016-2022)



2. méthodologie de la planification danoise

théorie de la conscience du choix

« *choice awareness* »¹

(Henrik Lund, *Université d'Aalborg, Danemark*)

- ❖ être conscients que nos sociétés ne donnent pas *automatiquement* un vrai choix
- ❖ être conscients des *blocages* (institutions, représentants des technologies XX siècle, discours « pas de choix ») et de la *désinformation* (idéologies, groupes d'intérêts)
- ❖ être conscients des *alternatives possibles et réalistes*
- ❖ être conscients d'avoir un *vrai choix* collectivement
- ❖ être conscients des *méthodes* pour poursuivre et garantir un véritable choix
- ❖ être conscients des *impacts des décisions* (écologiques, économiques, sociétaux)
- ▶ **information** objective, rigoureuse, complète, indépendante
- ▶ **transparence** des données et des actions



1. élaboration
d'alternatives technologiques
concrètes

2. études
de faisabilité économique

3. propositions
de mesures de régulation
publique

4. promotion
d'une nouvelle infrastructure
démocratique d'entreprises

¹ *Choice awareness : the development of technological and institutional choice in the public debate of danish energy planning*, Henrik Lund, J. Environmental Policy & Planning 2 (2000) 249-259

2. méthodologie de la planification danoise

connaître pour comprendre

□ *partage, maîtrise des connaissances scientifiques*

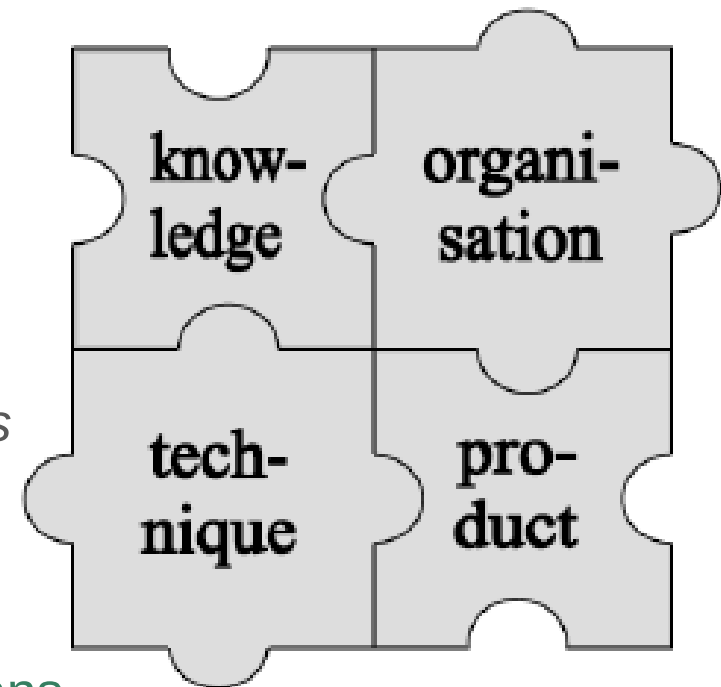
▶ *comprendre la complexité (1)*

- réchauffement climatique
- analyses des cycles de vie
- structures des systèmes énergétiques
- comportements individuels et collectifs

▶ *choisir en toute responsabilité*

□ *implication des chercheurs, ingénieurs, économistes*

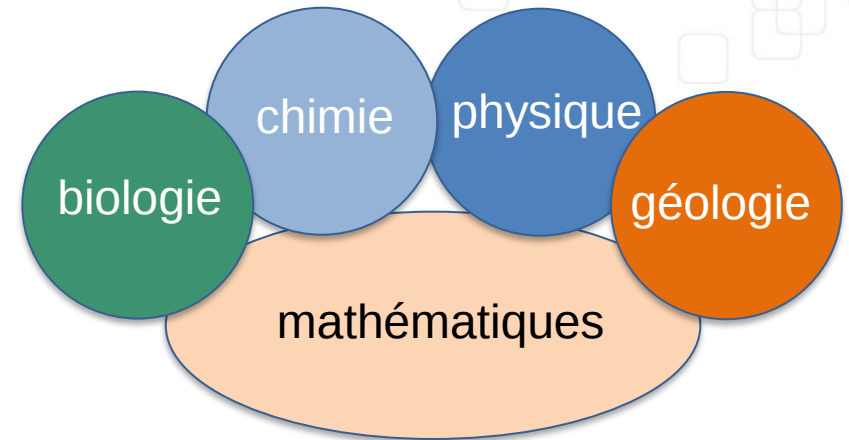
- ▶ rationalité des débats
- ▶ vérification des faits
- ▶ comparaison critique
- ▶ élaboration des études, stratégies alternatives, plans
- ▶ implémentation des changements



2. méthodologie de la planification danoise

► comprendre la complexité (2)

- réchauffement climatique
 - effets anthropiques / cycles naturels
 - forçage radiatif des gaz à effet de serre
 - interactions atmosphère-océans-glaces-biologie
 - rétroactions climatiques
 - paléoclimats et simulations climats futurs
- analyses des cycles de vie
 - ressources naturelles : eau, air, terres, sous-sols, océans, matériaux ; énergies de flux et de stock, biomasse
 - soutenabilité, équilibre, mesure, sobriété, économie circulaire, santé / GES, épuisement, appauvrissement, productivisme, déchets, pollution, démesure, hubris, maladies
- structures des systèmes énergétiques
 - sources d'énergie et modes de production, distribution, consommation, stockage d'énergie : énergies renouvelables/fossiles/fissiles, sobriété/surconsommation, efficacité/inefficacité, couplage&optimisation des réseaux d'énergie/découplage-juxtaposition des réseaux, etc.
 - impact déterminant : régulation, cohérence, planification/dérégulation, déconnexion, imprévision
- comportements individuels et collectifs
 - cohérence, interactions, interdépendances, solidarités : production agricole ↔ choix alimentaires, biodiversité ; transports et chauffage et achats ↔ énergie & pollution & emplois



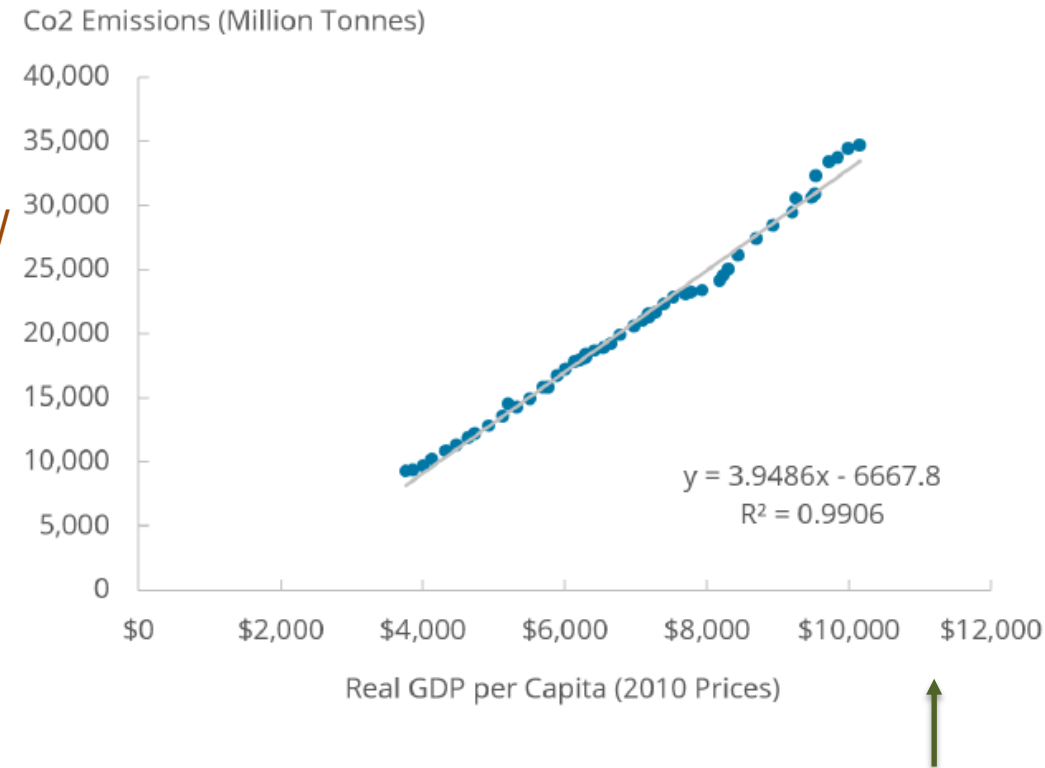
(1)
suite

2. méthodologie de la planification danoise

ex. 1 : controverse PIB / GES

- systèmes productivistes classiques hérités du XIX-XX^e siècles
 - ▶ corrélation linéaire mondiale moyenne PIB / émissions GES observée
 - ▶ hypothèses (invalidées aujourd'hui) :
 - *émissions de GES $\propto$ consommation EP*
 - *consommation EP $\propto$ PIB*

mais...



World Bank, 2019 and World Resources Institute, 2017

2. méthodologie de la planification danoise

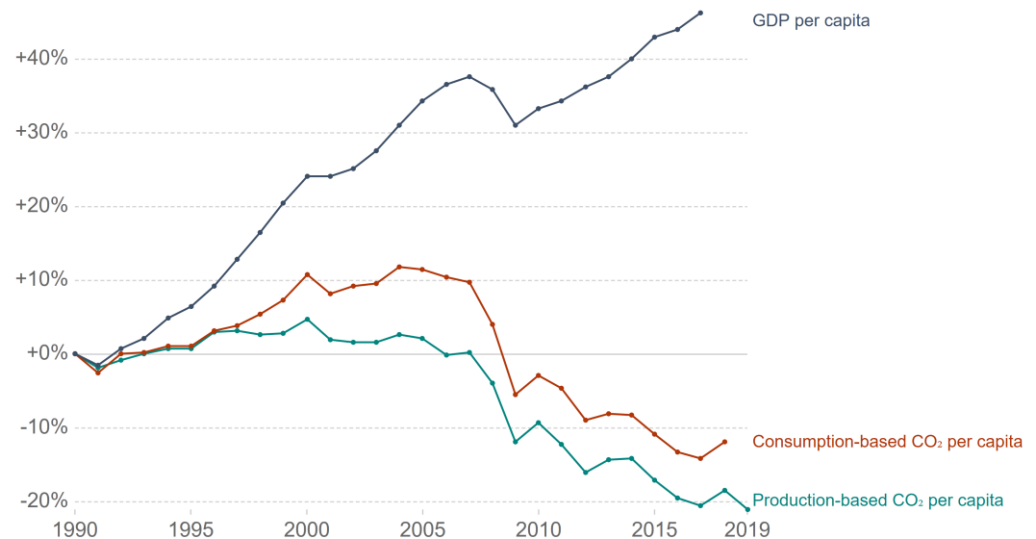
ex. 1 : controverse PIB / GES

... changement en cours

- systèmes économiques efficaces en transition énergétique
 - découplage PIB / émissions GES
 - efficacité énergétique
 - EnR
 - Stockages
 - SERI (syst. éner. ren. intel.)
 - sobriété (économies, recyclage)

Change in per capita CO₂ emissions and GDP, United States

Annual consumption-based emissions are domestic emissions adjusted for trade. If a country imports goods the CO₂ emissions needed to produce such goods are added to its domestic emissions; if it exports goods then this is subtracted.



Our World
in Data

a based on Global Carbon Project; UN Population; and World Bank
1 constant 2011 international-\$ which adjust for inflation and cross-country price differences.
and-other-greenhouse-gas-emissions • CC BY

*Our world in data. CO₂ and greenhouse gas emissions
Hannah Ritchie and Max Roser (2020)*



*Net Zero by 2050. A Roadmap for the Global Energy Sector (IEA, 2021)
(TES = total energy supply ; TFC = total final consumption)*



	Indicator					CAAGR (%)	
	2019	2020	2030	2040	2050	2020-2030	2020-2050
Population (million)	7 672	7 753	8 505	9 155	9 692	0.9	0.7
GDP (USD 2019 billion, PPP)	134 710	128 276	184 037	246 960	316 411	3.7	3.1
GDP per capita (USD 2019, PPP)	17 558	16 545	21 638	26 975	32 648	2.7	2.3
TES/GDP (GJ per USD 1 000, PPP)	4.543	4.578	2.973	2.164	1.716	-4.2	-3.2
TFC/GDP (GJ per USD 1 000, PPP)	3.231	3.208	2.139	1.468	1.086	-4.0	-3.5
TES per capita (GJ)	79.77	75.74	64.33	58.38	56.03	-1.6	-1.0
CO ₂ intensity of electricity generation (kg CO ₂ per kWh)	0.468	0.438	0.138	-0.001	-0.005	-11	n.a.

2. méthodologie de la planification danoise

↳ ex. 2 : controverse hydrogène

- l'hydrogène n'est pas une *source* mais un *vecteur* d'énergie
- systèmes hydrogène :
 - ▶ quelles technologies ? quelles sources d'énergie pour le produire ?
 - ▶ coûts d'investissement ? de production ? de transport ? de stockage ?
 - ▶ rendements de chaîne production – transport – stockage – conversions – utilisations ?
 - ▶ vieillissement ? recyclage ?
 - ▶ comparaison critique avec les autres vecteurs et systèmes pour les mêmes utilisations ?

↳ ex. 3 : controverses énergies renouvelables / nucléaire

- **éolien, solaire** : variabilité ? prévisibilité ? complémentarités ? lissages par stockages ? esthétique et paysages ? efficacités ? GES ? temps de retour énergétique ? recyclabilité ? terres rares, métaux critiques ? coûts investissement ? coût actualisé du kWh ?
- **hydroélectricité, biomasse, géothermie, hydroliennes, houlomotrices** : énergies de stock ? variabilité ? prévisibilité ? complémentarités ? stockages ? durabilité ? quantités ?
- **nucléaire** : dépendance aux importations d'uranium, terres rares ? coûts d'investissement ? coût actualisé du kWh ? durée de construction ? durée de démantèlement ? Risques et étendue d'accidents majeurs ? contaminations radioactives ? vieillissement des réacteurs ? GES ? temps de retour énergétique ? déchets nucléaires ? assurances ?

2. méthodologie de la planification danoise

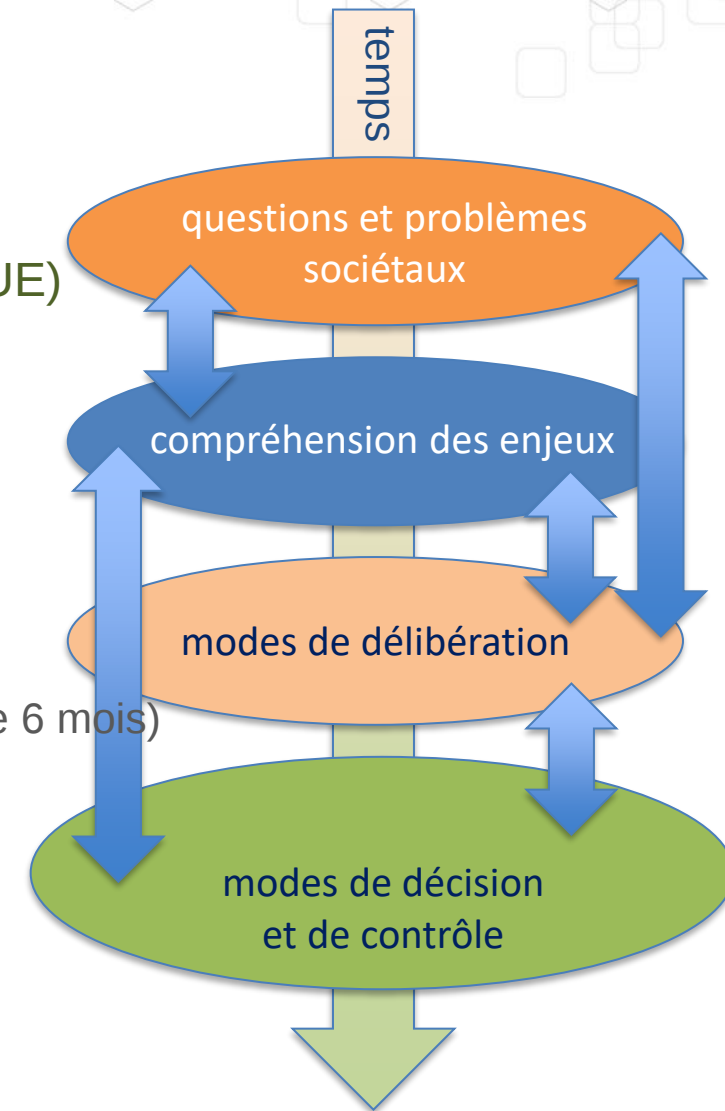
↳ ex. 4 : véhicules électriques rechargeables / véhicules thermiques

- batteries pour les VER :
 - ▶ technologies (Li-ion, Na-ion, X-Cl₂, Al-air, Zn-air, etc., électrolytes liquides/solides) ?
 - ▶ métaux rares ou abondants ? vieillissement ? recyclage ? extraction polluante ou propre ?
 - ▶ quels coûts énergétiques de fabrication ? émissions de GES à la fabrication ?
 - ▶ capacités de stockage massive ou réduite ? puissances de stockage/déstockage ?
- comparaison VER / VT :
 - ▶ analyse des cycles de vie complets ?
 - ▶ consommations (kWh/100 km) ? rendements énergétiques complets ?
 - ▶ temps de retour énergétique ? émissions comparées de GES VER / VT ?
 - ▶ bornes de recharge électrique : répartition, puissances, alimentations, prix ?
 - ▶ impacts et choix de l'origine de l'électricité de recharge ?
 - ▶ freinage par récupération et pollution atmosphérique comparée VER / VT ?
 - ▶ VER = moyen de stockage massif d'électricité renouvelable disponible ?

2. méthodologie de la planification danoise

du débat à la décision et au contrôle

- ❖ appropriation publique et citoyenne
 - connaissances scientifiques
 - statistiques, données (locales, régionales, nationales, UE)
 - structures de débat (conseils locaux de la transition)
- ❖ articulation des échelles de planification
 - communes (métropoles, comcoms, cantons) :
 - initiative, décision, élaboration des plans climat-énergie
 - association de toutes les parties prenantes locales
 - publicité et mise à jour des statistiques (GES, énergies)
 - méthode essais & erreurs (plan 4 ans, bilan 2 ans, contrôle 6 mois)
 - régions (géographiquement cohérentes) :
 - coordination, cohérence, conseil-aide aux communes
 - coordination, cohérence avec l'Etat, les services
 - État :
 - mise en cohérence des plans régionaux avec l'UE
 - élaboration des plans nationaux et accords parlement-État



2. méthodologie de la planification danoise

du débat à la décision et au contrôle (suite)

❖ planification climatique dans les Communes danoises

- bilan

- 96% des Communes ont un **Plan Climat-Energie**
- 79% ont un **compte climatique municipal**, 89% un **compte climatique géographique** (dont la moitié débute avant 2015)
- domaines : énergie et bâtiments, transports et mobilité, agriculture et utilisation des terres, développement technologique et affaires, l'entreprise Commune
- objectifs : - 2,6%/an GES moy, neutralité C entre 2025 et 2050, 100% EnR 2030 à 2050

- 5 recommandations

- améliorer la législation, la réglementation avec les Communes (retour d'expérience)
- étendre et approfondir les PCE pour toutes les communes
- améliorer les bases de données énergie-climat
- évaluer annuellement les PCE et leurs mises en œuvre
- élaborer et mettre à jour un catalogue d'instruments d'analyse des actions des Communes dans tous les secteurs

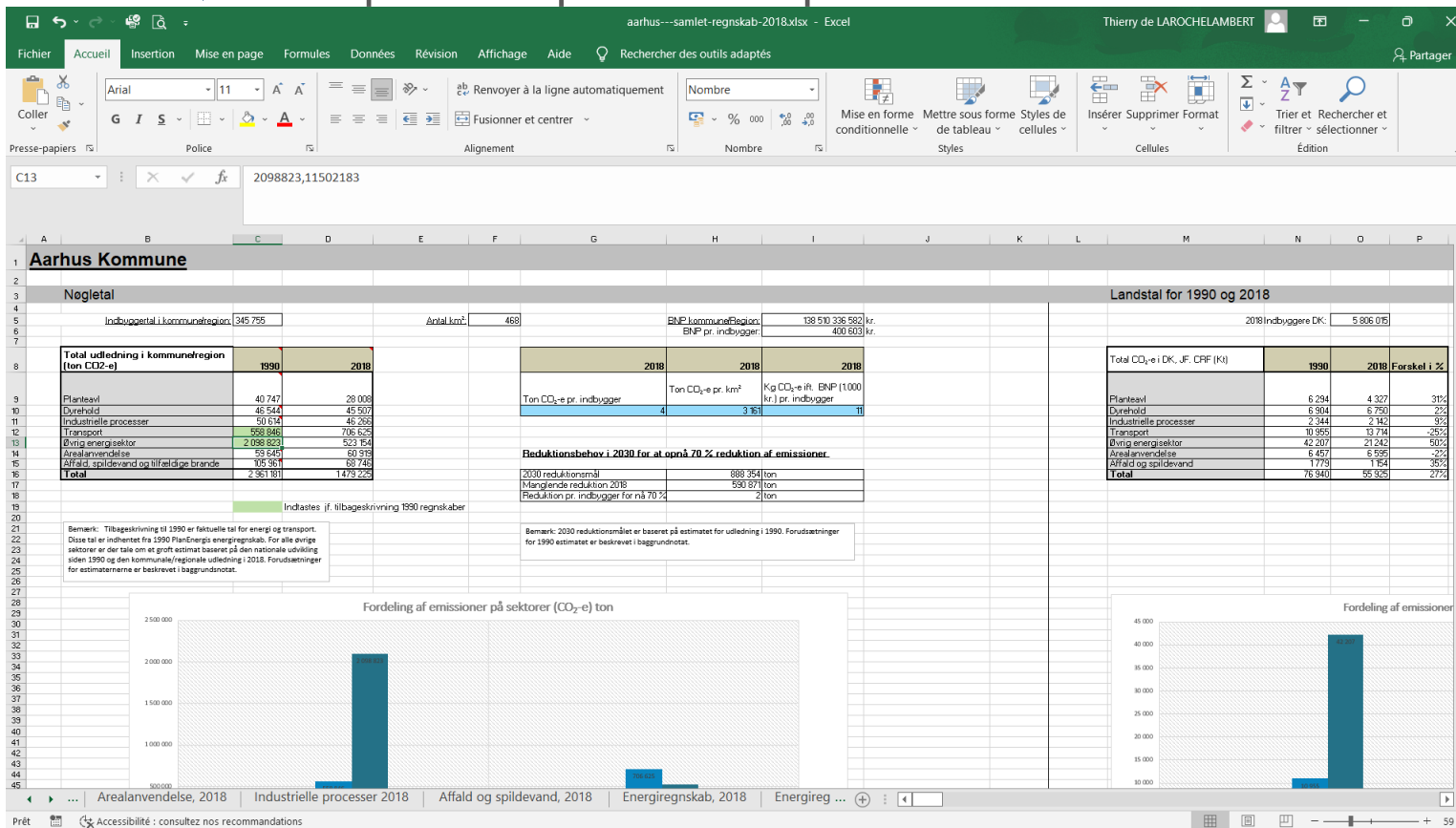


Planification climatique dans les municipalités
Statut des municipalités danoises
planification préventive du climat (février 2020)

2. méthodologie de la planification danoise

du débat à la décision et au contrôle (suite)

exemple: compte climatique d'Aarhus



Klimaregnskaber (geografisk på kommuneniveau)

<https://www.rm.dk/regional-udvikling/publikationer/publikationer-om-baredygtighed-og-gron-omstilling/klimaregnskaber/>

Klimaregnskaber (geografisk på kommuneniveau)

Klimaregnskabet er en videreudvikling af energiregnskabet. Det er opgjort på kommuneniveau geografisk og samlet for den geografiske Region Midtjylland.

Klimaregnskabet er sektordelt for drivhusgasserne kuldioxid (CO₂), metan (CH₄) og lertegasser (N₂O) for følgende sektorer:

- Landbrug, skovbrug og anden arealanvendelse
- Affald og spildevand
- Industrielle processer og produktanvendelse

Regnskabet er opbygget med det nationale Klimaregnskab og FN's retningslinjer som forbillede.

Region Midtjylland - Samlet regnskab 2018.xlsx

Favrskov - Samlet regnskab 2018.xlsx

Hedensted - Samlet regnskab 2018.xlsx

Herning - Samlet regnskab 2018.xlsx

Holstebro - Samlet regnskab 2018.xlsx

Horsens - Samlet regnskab 2018.xlsx

Ikast-Brande - Samlet regnskab 2018.xlsx

Lemvig - Samlet regnskab 2018.xlsx

Norddjurs - Samlet regnskab 2018.xlsx

Odder - Samlet regnskab 2018.xlsx

Randers - Samlet regnskab 2018.xlsx

Ringkøbing-Skjern - Samlet regnskab 2018.xlsx

Samsø - Samlet regnskab 2018.xlsx

Silkeborg - Samlet regnskab 2018.xlsx

Skanderborg - Samlet regnskab 2018.xlsx

Skive - Samlet regnskab 2018.xlsx

Struer - Samlet regnskab 2018.xlsx

Syddjurs - Samlet regnskab 2018.xlsx

Viborg - Samlet regnskab 2018.xlsx

Aarhus - Samlet regnskab 2018.xlsx

Klimaregnskaberne for 2018 viser, at skov over 30 år resulterer i en CO₂ emission. Der pågår aktuelt en granskning af de faktorer, som ligger til grund for dette resultat.

Vær opmærksom på at regnskaberne er blevet opdateret efter en procentvis tilbageskrivningsfejl til 1990. Denne fejl er blevet justeret pr. 1/10-2021 i ovenstående regnskaber.

2. méthodologie de la planification danoise

modélisation des systèmes énergétiques EnergyPLAN (Univ. Aalborg)

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 structurées dans EnergyPLAN par fichiers texte

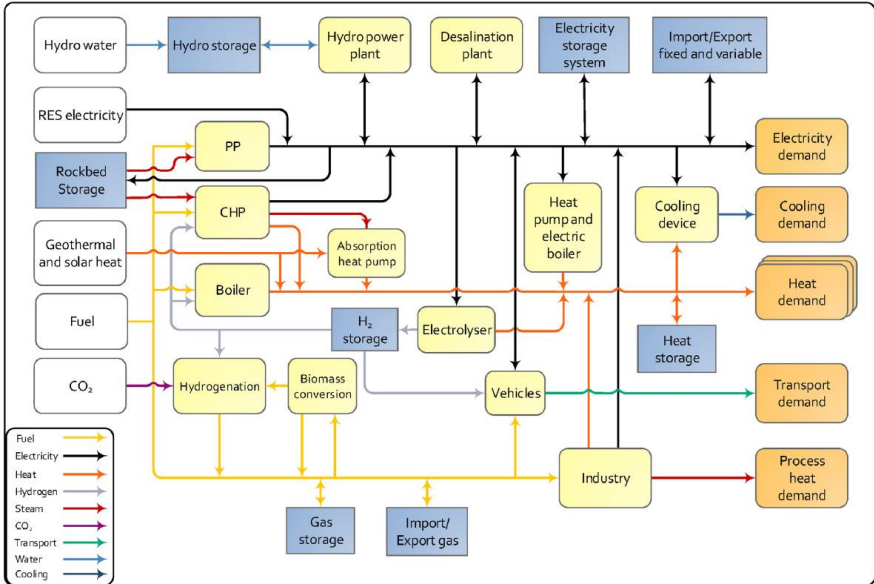
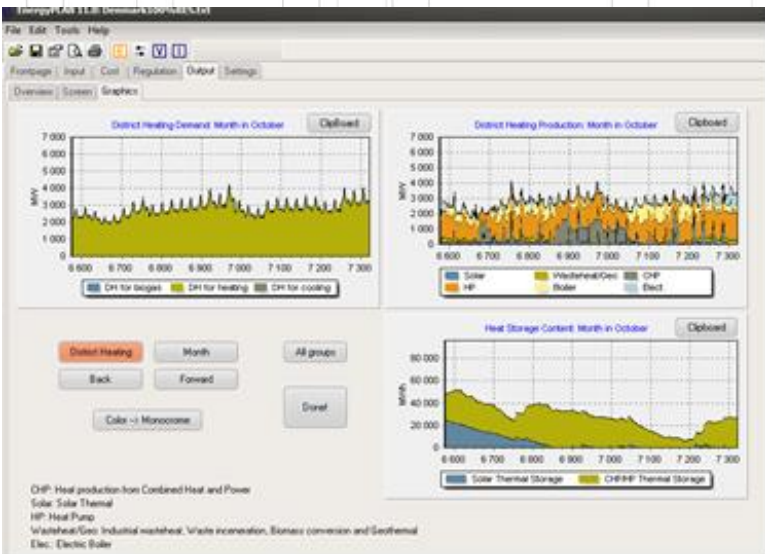
méthodologie d'analyse

- simulation heure par heure complète du système actuel à toutes échelles
- simulation heure par heure du système BAU 2030 - 2050
- scénario brut alternatif non équilibré par secteur et besoin final
- faisabilité économique et objectifs climatiques non assurés

analyse du système énergétique évolutif 2030 - 2050

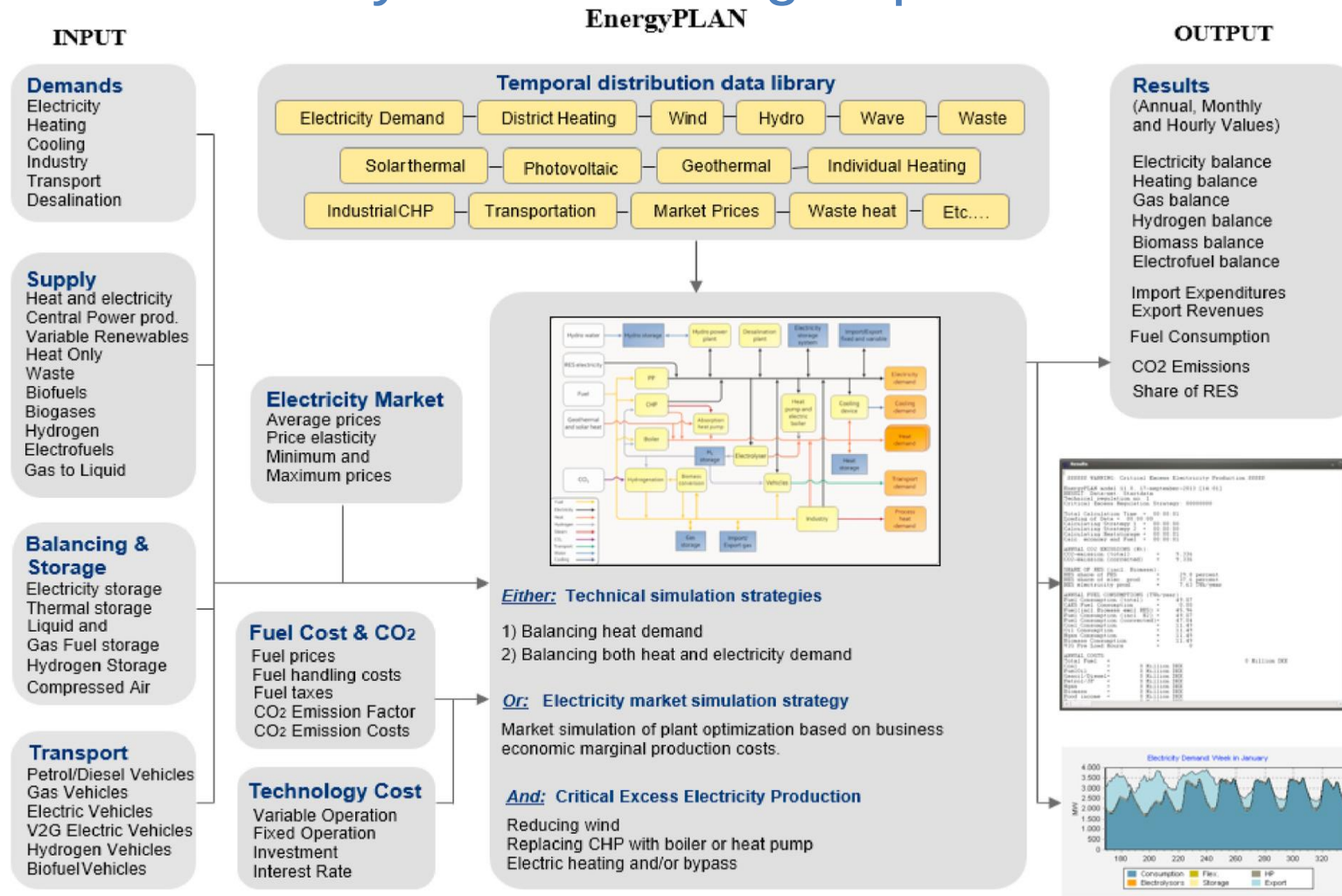
- simulation heure par heure EnergyPLAN (coûts, échanges, stockage, quotas CO2, etc)
- optimisations possibles du système
 - technique (équilibre demande/production)
 - économique

prolongement / innovation 100% EnR en 2050



2. méthodologie de la planification danoise

modélisation des systèmes énergétiques



2. méthodologie de la planification danoise

EnergyPlan (suite)

- feuilles Entrée

consommation d'électricité

The screenshot displays the EnergyPLAN 15 test: Startdata software interface. The main window is titled 'Electricity Demand and Fixed Import/Export'. On the left, there is an 'Overview' sidebar with a tree view containing 'Demand', 'Supply', 'Balancing and Storage', 'Cost', 'Simulation', and 'Output'. The 'Demand' section is expanded, showing sub-items: Electricity, Heating, Cooling, Industry and Fuel, Transport, and Desalination. The main area contains a table of input parameters for electricity demand and fixed import/export, with values in TWh/year and MW. A diagram on the right illustrates the flow of electricity demand, showing 'Import/Export fixed and variable' and 'Electricity demand' boxes connected by arrows.

Parameter	Value	Unit	Notes
Electricity demand*	20	TWh/year	Change distribution Hour_electricity.txt
Additional electricity demand	0	TWh/year	Change distribution const.txt
Electric heating (IF included)	0	TWh/year	Subtract electric heating using distribution from 'individual' window
Electric cooling (IF included)	0	TWh/year	Subtract electric cooling using distribution from 'cooling' window
Elec. for Biomass Conversion	0.00	TWh/year	(Transferred from Biomass Conversion TabSheet)
Elec. for Transportation	0.00	TWh/year	(Transferred from Transport TabSheet)
Sum (excluding electric heating and cooling)	20.00	TWh/year	
Electric heating (individual)	0.00	TWh/year	
Electricity for heat pumps (individual)	0.00	TWh/year	
Electric cooling	0.00	TWh/year	
Flexible demand (1 day)	0	TWh/year	Max-effect 1000 MW
Flexible demand (1 week)	0	TWh/year	Max-effect 1000 MW
Flexible demand (4 weeks)	0	TWh/year	Max-effect 1000 MW
Fixed Import/Export	0	TWh/year	Change distribution Hour_Tysklandsexport.txt
Total electricity demand*	20.00	TWh/year	

2. méthodologie de la planification danoise

EnergyPlan (suite)

■ feuilles Entrée

consommation de chaleur

EnergyPLAN 12.0: Startdata

Home Add-On Tools Help

Home New Import from excel Save As Settings Notes Web Run (Clipboard) Run (Screen) Run (Print) Run (Serial) Treeview Tabs Show Hints*

Warnings Appear Here:

Overview

Demand Electricity Heating Cooling Industry and Fuel Transport Water

Supply Balancing and Storage Cost Simulation Output Notes Delete Import From Excel

Electricity Heating Cooling Industry and Fuel Transport Water

Total Heat Demand (Individual plus District Heating) 17,50

Individual Heating:

TWh/year	Fuel Consumption		Efficiency Thermal	Heat Demand	Efficiency Electric	Capacity Limit*	Estimated Electricity Production	Solar Thermal	
	Input	Output						Heat Storage*	Share*
Distribution: Heat Hour_distr-heat.txt									
Coal boiler :	0	0,00	0,7	0,00				0	1
Oil boiler :	0	0,00	0,8	0,00				0	1
Ngas boiler :	0	0,00	0,9	0,00				0	1
Biomass boiler :	0	0,00	0,7	0,00				0	1
H2 micro CHP :		0,00	0,5	0	0,3	1	0,00	0	1
Ngas micro CHP :		0,00	0,5	0	0,3	1	0,00	0	1
Biomass micro CHP :		0,00	0,5	0	0,3	1	0,00	0	1
Heat Pump :				0	3	1	0,00	0	1
Electric heating :				0		1	0,00	0	1
Total Individual:		0,00		0,00			0,00		

District Heating:

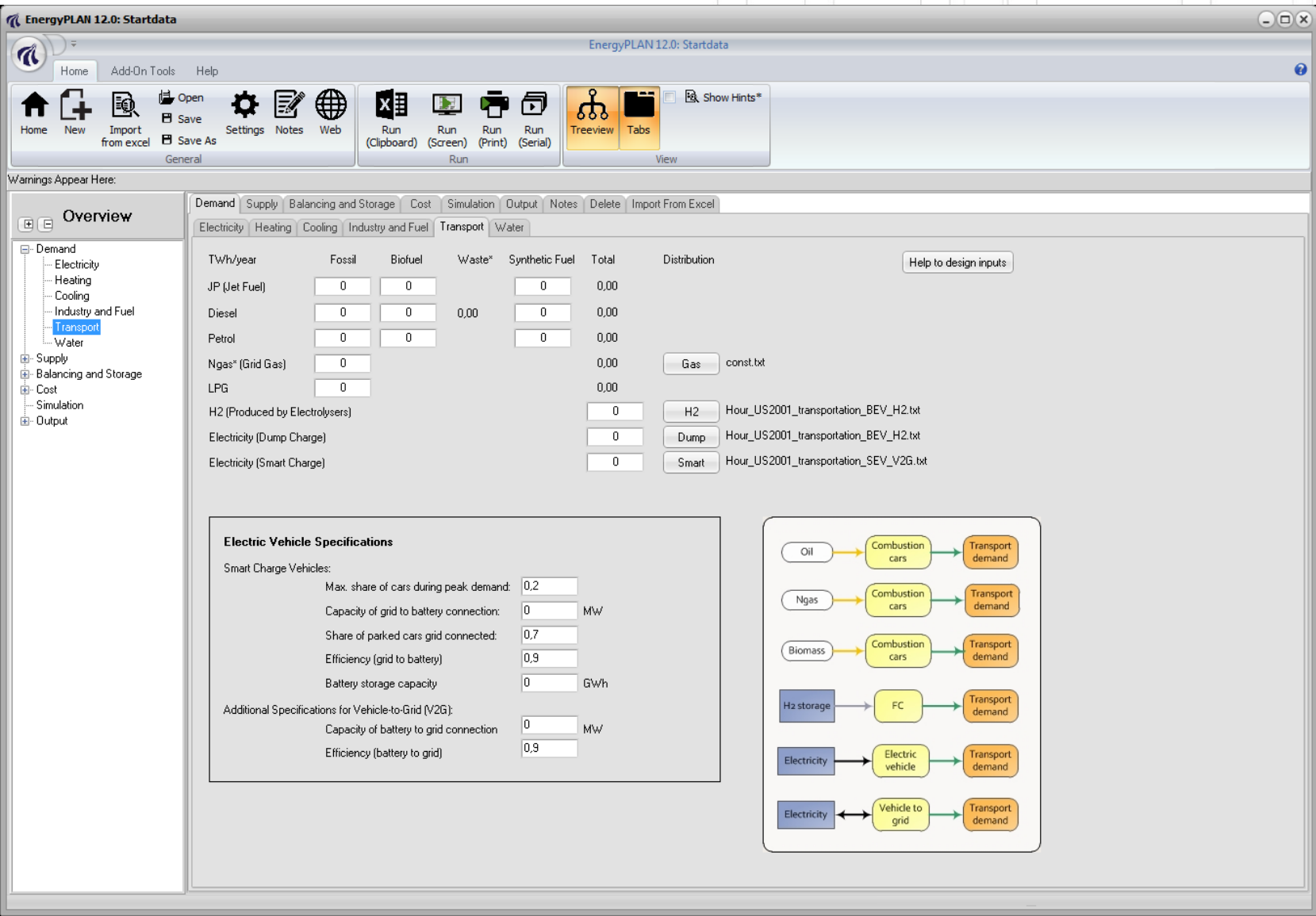
	Group 1:	Group 2:	Group 3:	Total:	Distribution:
Production:	0	10	10	20,00	Change Hour_distr-heat.txt
Network Losses:	0,2	0,15	0,1		
Heat Demand:	0,00	8,50	9,00	17,50	

Hour_solar1_pcd.txt

2. méthodologie de la planification danoise

EnergyPlan (suite)

- feuilles Entrée
- consommation transports



2. méthodologie de la planification danoise

EnergyPlan (suite)

■ feuilles Entrée

productions électricité chaleur

EnergyPLAN 14.0: Startdata

Home Add-On Tools Help

Home New Open Save Settings Notes Web Run (Clipboard) Run (Screen) Run (Print) Run (Serial) Treeview Tabs Show Hints* Show Hourly Values

Warnings Appear Here:

Overview

- Demand
 - Electricity
 - Heating
 - Cooling
 - Industry and Fuel
 - Transport
 - Water
- Supply
 - Heat and Electricity
 - Central Power Production
 - Variable Renewable Electricity
 - Heat Only
 - Fuel Distribution
 - Waste
 - Liquid and Gas Fuels
 - CO2
 - Balancing and Storage
 - Cost
 - Simulation
 - Output

Group 1: Group 2: Group 3: Total: Unit:

Electricity Production: District Heating Production: 0.00 10.00 10.00 20.00 TWh/year

Boilers

	Group 1	Group 2	Group 3	Unit
Thermal Capacity	5000	5000		MJ/s
Boiler Efficiency	0.9	0.9	0.9	Percent
Fixed Boiler share	0	0	0	

Combined Heat and Power (CHP)

CHP Condensing Mode Operation*

	Group 1	Group 2	Group 3	Unit
Electric Capacity (PP1)	4000			MW-e
Electric Efficiency (PP1)	0.45			

CHP Back Pressure Mode Operation*

	Group 1	Group 2	Group 3	Unit
Electric Capacity	1000	1500		MW-e
Thermal Capacity	Auto	1250	1875	MJ/s
Electric Efficiency	0.4	0.4		
Thermal Efficiency	0.5	0.5		

Industrial CHP

	Group 1	Group 2	Group 3	Total	Unit
CHP Electricity	0	0	0	0.00	TWh/year
CHP Heat Produced	0	0	0	0.00	TWh/year
CHP Heat Demand	0	0	0	0.00	TWh/year
CHP Heat Delivered*	0.00	0.00	0.00	0.00	TWh/year

Distribution Hour_cshpel.txt

Group 1 represents district heating systems with no CHP
Group 2 represents district heating systems based on small CHP plants
Group 3 represents district heating systems based on large CHP extraction plants

CHP plants are modelled as a combination of CHP back pressure and condensing plants so the Max CHP3 is the PP1 Capacity, which is:

2. méthodologie de la planification danoise

EnergyPlan (suite)

- feuilles Entrée

équilibrage et stockage électriques

EnergyPLAN 12.0: Startdata

Home Add-On Tools Help

Home New Import from excel Open Save Settings Notes Web Run (Clipboard) Run (Screen) Run (Print) Run (Serial) Treeview Tabs Show Hints*

Warnings Appear Here:

Overview

- Demand
- Supply
- Balancing and Storage
 - Electricity
 - Thermal
 - Liquid and Gas Fuel
- Cost
- Simulation
- Output

Demand Supply Balancing and Storage Cost Simulation Output Notes Delete Import From Excel

Electricity Thermal Liquid and Gas Fuel

Electric grid stabilisation requirements:

Minimum grid stabilisation production share: 0,3

Stabilisation share of CHP2: 0

Stabilisation share of Waste CHP: 0

Stabilisation share smart charge EV and V2G: 0 Share of charge connection

Stabilisation share transmission line: 0 Share of max capacity

Minimum CHP in gr. 3: 300 MW

Minimum PP: 0 MW

Critical Excess Electricity Production (CEEP)

Critical Electricity Excess Production (CEEP) regulation: Write number: 0

1: Reducing RES1 and RES2

2: Reducing CHP in gr.2 by replacing with boiler

3: Reducing CHP in gr.3 by replacing with boiler

4: Replacing boiler with electric heating in gr.2 with maximum capacity: 100 MW

5: Replacing boiler with electric heating in gr.3 with maximum capacity: 100 MW

6: Reducing RES3

7: Reducing power plant in combination with RES1, RES2, RES3 and RES4

8: Increasing CO2Hydrogenation (See Tabsheet Synthetic Fuel) if available capacity

Note: Electricity interconnection is defined under the 'Cost->Investment->External Electricity Market' tabsheet

Electricity Storage

	Capacities	Efficiencies	Fuel Ratio *)	Storage Capacity
Pump/Compressor	0	0,8		0 GWh
Turbine	0	0,9	0	

Allow for simultaneous operation of turbine and pump: No

*) Fuel ratio = fuel input / electric output (for CAES technologies or similar)

Advanced CAES

Electricity storage system

2. méthodologie de la planification danoise

EnergyPlan (suite)

- feuilles Entrée

renouvelables variables

EnergyPLAN 14.0: Startdata

Home Add-On Tools Help

Home New Open Save Settings Notes Web Run (Clipboard) Run (Screen) Run (Print) Run (Serial) Treeview Tabs Show Hints* Show Hourly Values

Warnings Appear Here:

Overview

- Demand
 - Electricity
 - Heating
 - Cooling
 - Industry and Fuel
 - Transport
 - Water
- Supply
 - Heat and Electricity
 - Central Power Production
 - Variable Renewable Electricity**
 - Heat Only
 - Fuel Distribution
 - Waste
 - Liquid and Gas Fuels
 - CO2
- Balancing and Storage
- Cost
- Simulation
- Output

Variable Renewable Electricity

Renewable Energy Source	Capacity: MW	Stabilisation share	Distribution profile*	Estimated Production TWh/year	Correction factor	Estimated Post Correction production	Estimated capacity factor
Wind	1000	0	Change hour_wind_1.txt	2.07	0	2.07	0.24
Photo Voltaic	500	0	Change Hour_solar_prod1	0.35	0	0.35	0.08
Offshore Wind	0	0	Change hour_wind_2.txt	0.00	0	0.00	0.00
River Hydro	0	0	Change const.txt	0.00	0	0.00	0.00
Tidal	0	0	Change hour_tidal_power	0.00	0	0.00	0.00
Wave Power	0	0	Change Hour_wave_200*	0.00	0	0.00	0.00
CSP Solar Power	0	0	Change Hour_solar_prod1	0.00	0	0.00	0.00

Concentrated Solar Power

Annual solar input 0 TW/h/year Change hour_solar_prod1.txt

Storage capacity 0 GWh

Storage efficiency (losses) 0.5 Percent pr. hour

	Power capacity	Power efficiency	Stabilisation Share	Estimated Production TWh/year	Estimated Storage loss TWh/year
	0 MW-e	0.3	0	0.00	0.00

2. méthodologie de la planification danoise

EnergyPlan (suite)

- feuilles Entrée

émissions CO₂

EnergyPLAN 14.0: Startdata

Home Add-On Tools Help

Home New Open Save Save As Settings Notes Web Run (Clipboard) Run (Screen) Run (Print) Run (Serial) Treeview Tabs Show Hints* Show Hourly Values

Warnings Appear Here:

Overview

- Demand
 - Electricity
 - Heating
 - Cooling
 - Industry and Fuel
 - Transport
 - Water
- Supply
 - Heat and Electricity
 - Central Power Production
 - Variable Renewable Electric
 - Heat Only
 - Fuel Distribution
 - Waste
- Liquid and Gas Fuels
 - Biofuels
 - Biogases
 - Hydrogen
 - Electrofuels
 - Gas to Liquid
- CO2
- Balancing and Storage
- Cost
- Simulation
- Output

CO2 content in the fuels:

Fuel	Oil	Diesel	Coal	Petrol/LPG	Ngas	LPG	Waste
			95	74	56.7	59.64	32.5
							(kg/GJ)

CCS and CCR: Carbon Capture and Storage or Recycling

CO2 captured by CCS: 0 Mt

Electricity Consumption (Per unit): 0.37 MWh/t CO2

Electricity consumption: 0.00 TWh/year

CCS Capacity: 0 MW

Change regulation strategy: 1 Electricity demand for CCS is constant

Increase Capacity for Regulation to: 0 MW

CO2 captured for electrofuels: 0.00 Mt

2. méthodologie de la planification danoise

EnergyPlan (suite)

- feuilles Entrée
 - taxes énergie

EnergyPLAN 12.0: Startdata

Home Add-On Tools Help

Home New Import from excel Open Save Settings Notes Web Run (Clipboard) Run (Screen) Run (Print) Run (Serial) Treeview Tabs Show Hints*

Warnings Appear Here:

Overview

- Demand
- Supply
- Balancing and Storage
- Cost
 - General
 - Investment and Fixed OM
 - Heat and Electricity
 - Renewable Energy
 - Liquid and Gas Fuels
 - Heat Infrastructure
 - Road Vehicles
 - Other Vehicles
 - Transport Infrastructure
 - Other Infrastructure
 - Water
 - Additional
 - Fuel**
 - Variable OM
 - External Electricity Market
- Simulation
- Output

Demand Supply Balancing and Storage Cost Simulation Output Notes Delete Import From Excel

General Investment and Fixed OM Fuel Variable OM External Electricity Market

Fuels and Taxes

Fuel price alternative: Basic

	Coal	FuelOil	Diesel Gasoil	Petrol/JP	Ngas	LPG	Waste	Biomass	Dry Biomass	Wet Biomass	Nuclear/Uranium
Fuel Price [world market prices] (DKK/GJ)	0	0	0	0	0	0	+ 0	0	0	0	0

Fuel handling costs (distribution and refinery) (DKK/GJ)

To Biomass Conversion Plants								0	0	0	
To central CHP and power stations	0	0			0		0	0			
To dec. CHP, DH and Industry	0	0			0		0	0			Biomass: E.g. straw and wood incl. pellets
To Individual house holds	0		0		0		0	0			Dry Biomass: Green energy crops for Biomass conversion
To transportation (road and train)			0	0	0		0	0			Wet Biomass: E.g. manure etc. for biogas production
To transportation (air)				0							

Taxes (DKK/GJ)

Individual households	0		0		0			0			
Industry	0	0			0		0	0			
Boilers (at CHP and DH plants)	0	0			0		0	0			
CHP units	0	0			0		0	0			
Compressed Air Energy Storage (CAES)					0						

Taxes on electricity for energy conversion:

(DKK/MWh)	DH systems	Individual houses
Electric heating	0	0
Heat Pumps	0	0
Electrolysers	0	0
Electric cars		0
Pump (storage)	0	

2. méthodologie de la planification danoise

EnergyPlan (suite)

■ feuilles Entrée

capex

EnergyPLAN 14.0: Startdata

EnergyPLAN 14.0: Startdata

HomeAdd-On ToolsHelp

HomeNewOpenSaveSave AsSettingsNotesWeb

Run (Clipboard)Run (Screen)Run (Print)Run (Serial)

TreeviewTabsShow Hints*Show Hourly Values

GeneralRunView

Warnings Appear Here:

Overview

Demand

- Electricity
- Heating
- Cooling
- Industry and Fuel
- Transport
- Water

Supply

- Heat and Electricity
- Central Power Production
- Variable Renewable Electric
- Heat Only
- Fuel Distribution
- Waste

Liquid and Gas Fuels

- Biofuels
- Biogases
- Hydrogen
- Electrofuels
- Gas to Liquid

CO2

Balancing and Storage

- Electricity
- Thermal
- Liquid and Gas Fuel

Cost

- General
- Investment and Fixed OM
 - Heat and Electricity
 - Renewable Energy
 - Liquid and Gas Fuels
 - Heat Infrastructure
 - Road Vehicles
 - Other Vehicles
 - Water
 - Additional
- Fuel
- Variable OM
- External Electricity Market

Simulation

Output

Prod. type	Investment		Period	O. and M.	Total Inv. Costs	Annual Costs (MDKK/year)	
	Unit	MDKK pr. Unit	Years	% of Inv.		MDKK	Investment
Small CHP units	1000 MW-e	0	0	0	0	0	0
Large CHP units	1500 MW-e	0	0	0	0	0	0
Heat Storage CHP	20 GWh	0	0	0	0	0	0
Waste CHP	0.00 TWh/year	0	0	0	0	0	0
Absorp. HP (Waste)	0 MW-th	0	0	0	0	0	0
Heat Pump gr. 2	0 MW-e	0	0	0	0	0	0
Heat Pump gr. 3	100 MW-e	0	0	0	0	0	0
DHP Boiler group 1	0 MW-th	0	0	0	0	0	0
Boilers gr. 2 and 3	10000 MW-th	0	0	0	0	0	0
Electr. Boiler Gr 2+3	200 MW-e	0	0	0	0	0	0
Large Power Plants	2500 MW-e	0	0	0	0	0	0
Nuclear	0 MW-e	0	0	0	0	0	0
Interconnection	1600 MW	0	0	0	0	0	0
Pump	0 MW-e	0	0	0	0	0	0
Turbine	0 MW-e	0	0	0	0	0	0
Pump Storage	0 GWh	0	0	0	0	0	0
Indust. CHP Electr.	0.00 TWh/year	0	0	0	0	0	0
Indust. CHP Heat	0.00 TWh/year	0	0	0	0	0	0
Rock Steam Storage	0 GWh	0	0	0	0	0	0

2. méthodologie de la planification danoise

EnergyPlan (suite)

■ feuilles Entrée

opex

EnergyPLAN 14.0: Startdata

Home Add-On Tools Help

Home New Open Save Settings Notes Web Run (Clipboard) Run (Screen) Run (Print) Run (Serial) Treeview Tabs Show Hints* Show Hourly Values

Warnings Appear Here:

Overview

- Demand
 - Electricity
 - Heating
 - Cooling
 - Industry and Fuel
 - Transport
 - Water
- Supply
 - Heat and Electricity
 - Central Power Production
 - Variable Renewable Electricity
 - Heat Only
 - Fuel Distribution
 - Waste
 - Liquid and Gas Fuels
 - Biofuels
 - Biogases
 - Hydrogen
 - Electrofuels
 - Gas to Liquid
 - CO2
- Balancing and Storage
 - Electricity
 - Thermal
 - Liquid and Gas Fuel
- Cost
 - General
 - Investment and Fixed OM
 - Heat and Electricity
 - Renewable Energy
 - Liquid and Gas Fuels
 - Heat Infrastructure
 - Road Vehicles
 - Other Vehicles
 - Water
 - Additional
 - Fuel
 - Variable OM
 - External Electricity Market
- Simulation
- Output

Variable Operation and Maintenance Cost

District Heating and CHP systems

Boiler	0	DKK/MWh-h
CHP	0	DKK/MWh-h
Heat Pump	0	DKK/MWh-h
Electric heating	0	DKK/MWh-h

Power Plants

Hydro Power	0	DKK/MWh-h
Condensing	0	DKK/MWh-h
Geothermal	0	DKK/MWh-h
GTL M1	0	DKK/MWh-h-fuel-input
GTL M2	0	DKK/MWh-h-fuel-input

Storage

Electrolyser	0	DKK/MWh-h
Pump	0	DKK/MWh-h
Turbine	0	DKK/MWh-h
V2G Discharge *)	0	DKK/MWh-h
Hydro Power Pump	0	DKK/MWh-h
Steam Storage	0	DKK/MWh-h

Individual

Boiler	0	DKK/MWh-h
CHP	0	DKK/MWh-h
Heat Pump	0	DKK/MWh-h
Electric heating	0	DKK/MWh-h

*) Total cost of storing defined pr. MWh of electricity production
 **) Minimum selling price divided by maximum buying price

Marginal Costs of producing 1 MWh electricity

District Heating

Incr. CHP2 decr. HP2	0	DKK/MWh
Incr. CHP3 decr. HP3	0	DKK/MWh
Incr. CHP2 decr. B2	0	DKK/MWh
Incr. CHP3 decr. B3	0	DKK/MWh
Incr. B2 decr. HP2	0	DKK/MWh
Incr. B3 decr. HP3	0	DKK/MWh
Incr. B2 decr. EB2	0	DKK/MWh
Incr. B3 decr. EB3	0	DKK/MWh
incr. CHP2 decr. ELT2	0	DKK/MWh
incr. CHP3 decr. ELT3	0	DKK/MWh
incr. B2 decr. ELT2	0	DKK/MWh
incr. B3 decr. ELT3	0	DKK/MWh
incr. GTL decr. B3	0	DKK/MWh
incr. GTL decr. CHP3	0	DKK/MWh

Power Plants

Condensing Power	0	DKK/MWh
PP2	0	DKK/MWh
Hydro Power	0	DKK/MWh
Geothermal	0	DKK/MWh

Individual

Incr. Ngas:CHP decr. B.	0	DKK/MWh
Incr. Bio:CHP decr. B.	0	DKK/MWh
Incr. HP decrease EH	0	DKK/MWh

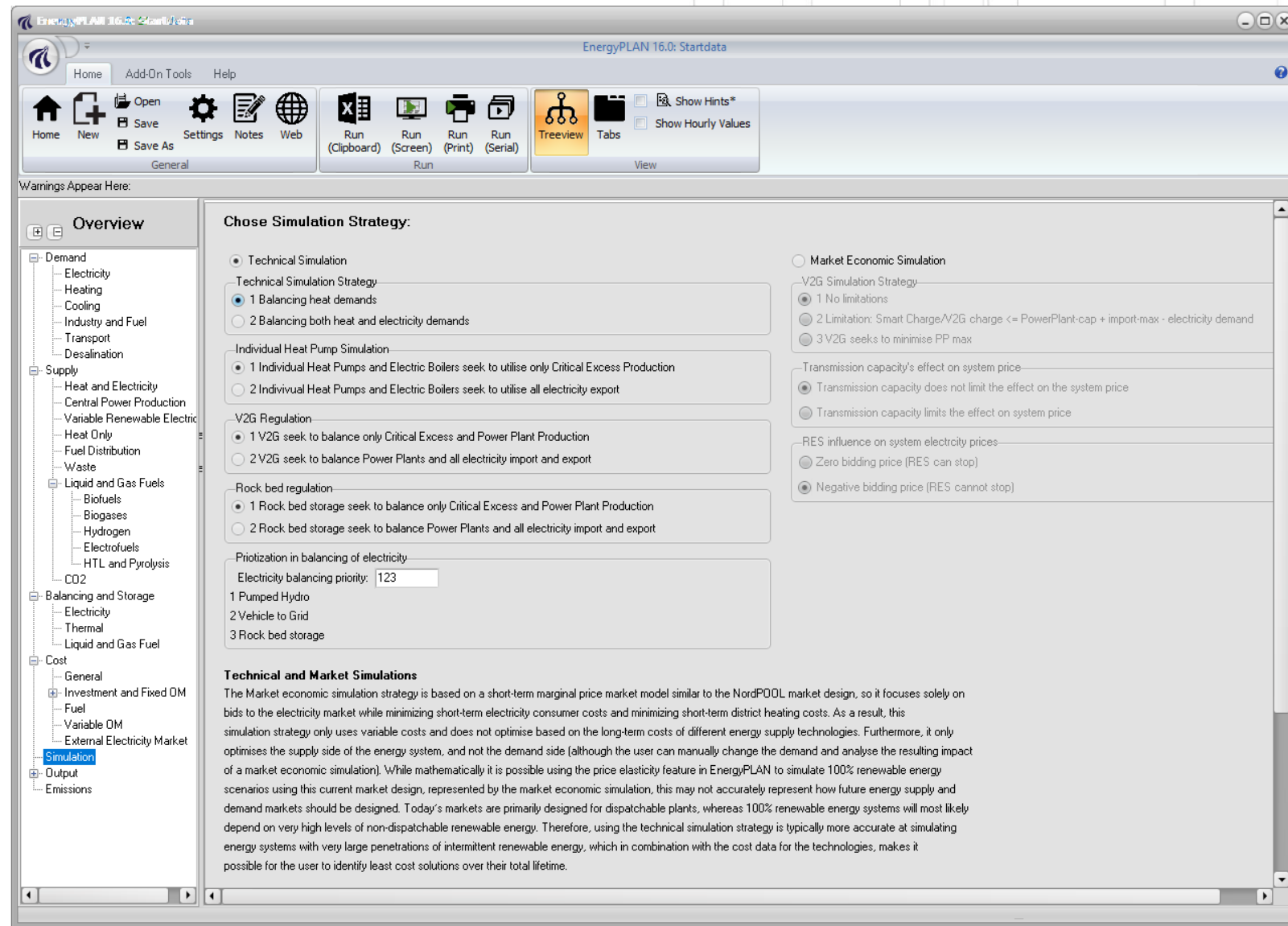
Marginal Costs of storing 1 MWh electricity

	DKK/MWh	Multiplication Factor **)
Individual		
Incr. H2:CHP decr. Boiler	0	2.03
Storage		
V2G (Electric Vehicle)	0	1.23
Pump/Turbine (CAES)	0	1.39
Hydro Pump Storage	0	3.37
Steam Storage	0	0.00

2. méthodologie de la planification danoise

EnergyPlan (suite)

- feuille Stratégie simulation



2. méthodologie de la planification danoise

EnergyPlan (suite)

- feuilles Sorties

émissions GES

EnergyPLAN 16.0: Startdata

Home Add-On Tools Help

Home New Open Save Settings Notes Web Run (Clipboard) Run (Screen) Run (Print) Run (Serial) Treeview Tabs Show Hints* Show Hourly Values

Warnings Appear Here:

Overview

- Demand
 - Electricity
 - Heating
 - Cooling
 - Industry and Fuel
 - Transport
 - Desalination
- Supply
 - Heat and Electricity
 - Central Power Production
 - Variable Renewable Electric
 - Heat Only
 - Fuel Distribution
 - Waste
- Liquid and Gas Fuels
 - Biofuels
 - Biogases
 - Hydrogen
 - Electrofuels
 - HTL and Pyrolysis
- CO2
- Balancing and Storage
 - Electricity
 - Thermal
 - Liquid and Gas Fuel
- Cost
 - General
 - Investment and Fixed OM
 - Fuel
 - Variable OM
 - External Electricity Market
- Simulation
- Output
 - Emissions**

Prod. type Unit for all: g/GJ input fuel

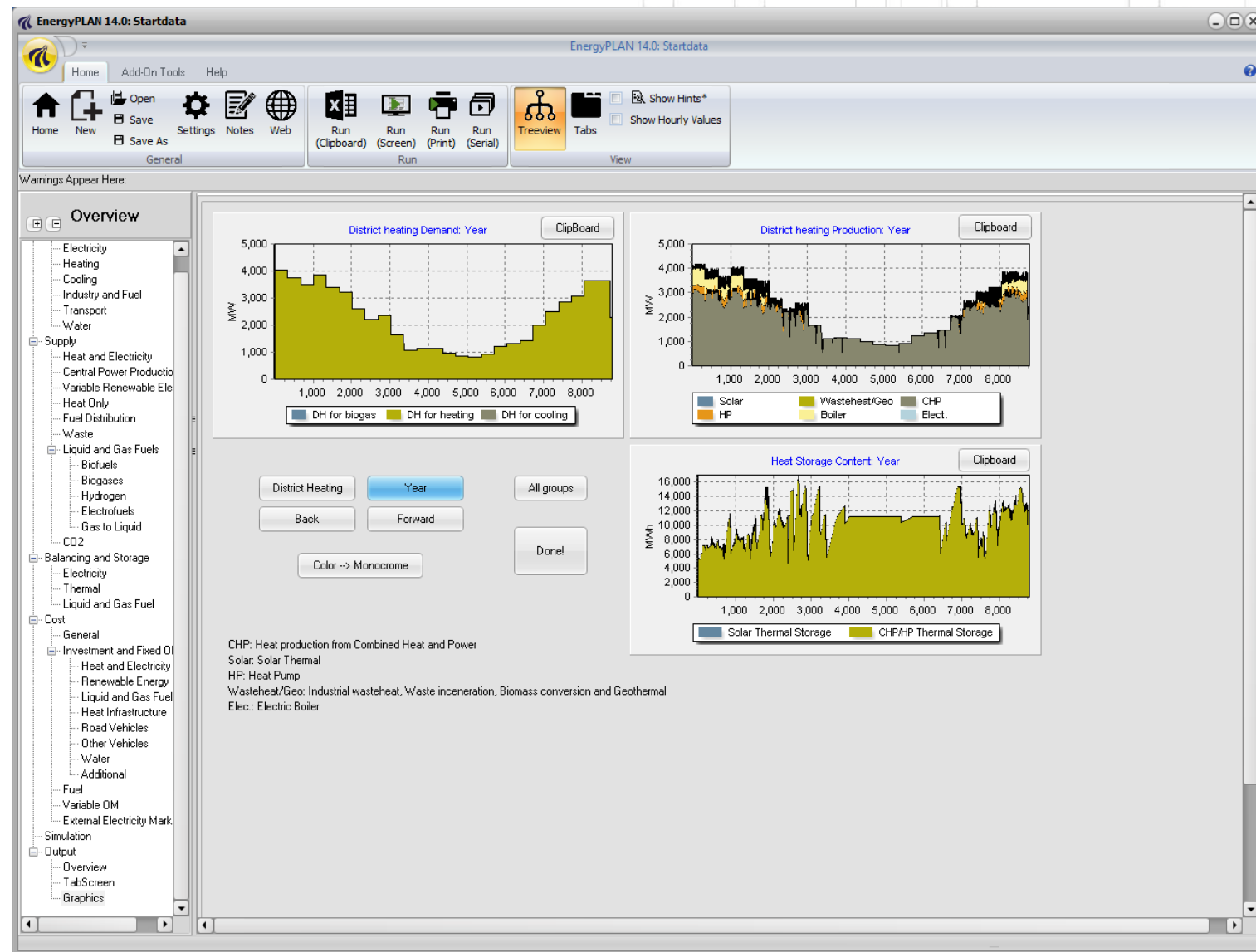
	SO2	PM2.5	NOx	CH4	N2O
Small CHP units	0	0	0	0	0
Large CHP units	0	0	0	0	0
Waste CHP	0	0	0	0	0
Large Power Plants	0	0	0	0	0
Nuclear	0	0	0	0	0
Biogas Plant	0	0	0	0	0
Gasification Plant	0	0	0	0	0
Indv. coal boilers	0	0	0	0	0
Indv. oil boilers	0	0	0	0	0
Indv. gas boilers	0	0	0	0	0
Indv. biomass boilers	0	0	0	0	0
DH boilers	0	0	0	0	0
Transport	0	0	0	0	0
Industry/variou	0	0	0	0	0

2. méthodologie de la planification danoise

EnergyPlan (suite)

■ feuilles Sorties

heure par heure
mensuelle
par énergie finale
état des stocks



2. méthodologie de la planification danoise

EnergyPlan (suite)

■ feuilles Sorties

tables bilan

Input										IDA2050										The EnergyPLAN model 7.20																																																																																																																		
Electricity demand (TWh/year):					Flexible demand					2.70					Group 2:					Capacities					Efficiencies					Regulation Strategy: Technical regulation no. 3					Fuel Price level:																																																																																																			
Fixed demand					28,40					Fixed Imp/exp.					0.00					CHP					1945					1297					0.54					0.36					KEOL regulation					23450					Capacities Storage Efficiencies																																																																															
Electric heating					0.00					Transportation					0.00					Heat Pump					150					525										3.50					Minimum Stabilisation share					0.00					MW-e					GWh					elec.					Ther.																																																																
Electric cooling					0.00					Total					31.10					Boiler					3484										0.95					Stabilisation share of CHP					0.00					Minimum CHP gr 3 load					0					MW					Hydro Pump:					0					0					0.85																																																						
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					Maximum import/export					0					MW					Electrol. Gr.2:					200					34					0.69					0.07																																		
District heating demand					2.95					13.49					24.34					40.79					Heat Pump					300					1050										3.50					Distr. Name :					Price_DKV_2008.bt					Electrol. Gr.3:					400					67					0.69					0.07																																																						
Solar Thermal					1.25					1.39					0.61					3.33					Boiler					7574										0.95					Electrol. trans.:					564					63					0.68																																																																										
Industrial CHP (CSHP)					0.00					0.00					2.65					2.65					Condensing					10333										0.64					Ely. MicroCHP:					0					0					0.73					CAES fuel ratio:					0.000																																																																
Demand after solar and CSHP					1.71					12.10					21.08					34.81					Heatstorage: gr.2: 40 GWh					gr.3: 10 GWh					Fixed Boiler: gr.2: 2.5 Per cent					gr.3: 1.0 Per cent					Multiplication factor					0.97					Dependency factor					0.02					DKK/MWh pr. MW					Average Market Price					497					DKK/MWh					(TWh/year)					Coal					Oil					Ngas					Biomass																													
Wind					4454 MW					12.63					TWh/year					0.00					Grid					Heatstorage: gr.2: 40 GWh					gr.3: 10 GWh					Fixed Boiler: gr.2: 2.5 Per cent					gr.3: 1.0 Per cent					Electrocity prod. from					CSHP					Waste (TWh/year)					Gr.1:					0.00					0.00					Gr.2:					0.00					0.99					Gr.3:					1.19					1.98					Transport					0.00					0.00					0.00					20.84				
Offshore Wind					4625 MW					18.98					TWh/year					0.00					stabil-					Electrocity prod. from					CSHP					Waste (TWh/year)					Gr.1:					0.00					0.00					Gr.2:					0.00					0.99					Gr.3:					1.19					1.98					Household					0.00					0.00					0.00					1.07																								
Photo Voltaic					3415 MW					4.5					TWh/year					0.00					salion					Electrocity prod. from					CSHP					Waste (TWh/year)					Gr.1:					0.00					0.00					Gr.2:					0.00					0.99					Gr.3:					1.19					1.98					Industry					0.00					0.00					0.00					23.61																								
Wave Power					700 MW					2.47					TWh/year					0.00					share					Electrocity prod. from					CSHP					Waste (TWh/year)					Gr.1:					0.00					0.00					Gr.2:					0.00					0.99					Gr.3:					1.19					1.98					Various					0.00					0.00					0.00					0.00																								
Hydro Power					0 MW					0					TWh/year															Electrocity prod. from					CSHP					Waste (TWh/year)					Gr.1:					0.00					0.00					Gr.2:					0.00					0.99					Gr.3:					1.19					1.98																																																	
Geothermal					0 MW					0					TWh/year															Electrocity prod. from					CSHP					Waste (TWh/year)					Gr.1:					0.00					0.00					Gr.2:					0.00					0.99					Gr.3:					1.19					1.98																																																	

Output																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																													
District Heating										Electricity										Exchange																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																									
Demand										Production										Consumption										Production										Balance										Payment																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																											
Distr.										Waste+										Elec.										Flexi-										Elec-										Hydro										Tur-										RES										Hy-										Geo-										Waste+										Stab-										Load										Imp										Exp										CEEP										EEP										Million DKK																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																			
heating										CSHP										DHP										CHP										HP										ELT										Boiler										EH										MW										MW										MW										MW										MW										MW										MW										MW										MW										MW										MW										MW										MW										MW										MW										MW										MW										MW										MW										MW										MW										MW										MW										MW										MW										MW										MW										MW										MW										MW										MW										MW										MW										MW										MW										MW										MW										MW										MW										MW										MW										MW										MW										MW										MW										MW										MW										MW										MW										MW										MW										MW										MW										MW										MW										MW										MW										MW										MW										MW										MW										MW										MW										MW										MW										MW										MW										MW										MW										MW										MW										MW										MW										MW										MW										MW										MW										MW										MW										MW										MW										MW										MW										MW										MW										MW										MW										MW										MW										MW										MW										MW										MW										MW										MW										MW										MW										MW										MW										MW										MW										MW										MW										MW										MW										MW										MW										MW										MW										MW										MW										MW										MW										MW										MW										MW										MW										MW										MW										MW										MW										MW										MW										MW										MW										MW										MW										MW										MW										MW										MW										MW										MW										MW										MW										MW										MW										MW										MW										MW										MW										MW										MW										MW										MW										MW										MW										MW										MW										MW										MW										MW										MW										MW										MW										MW										MW										MW										MW										MW										MW										MW										MW										MW										MW										MW										MW										MW										MW										MW										MW										MW										MW										MW										MW										MW										MW										MW										MW										MW										MW										MW										MW										MW										MW										MW										MW										MW										MW										MW										MW										MW										MW										MW										MW										MW										MW										MW										MW										MW										MW										MW										MW										MW										MW										MW										MW										MW										MW										MW										MW									

3. retours d'expérience du Danemark

l'exemple danois

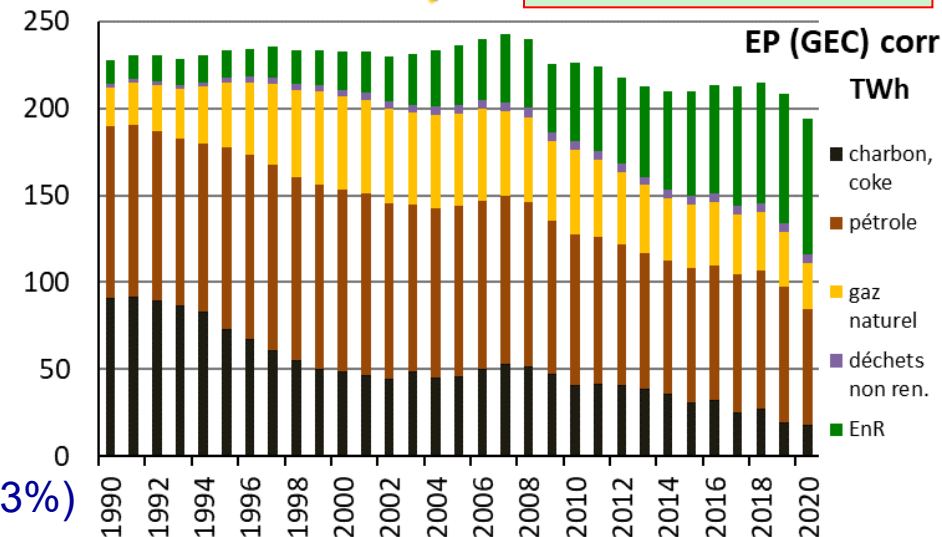
- politique planifiée démocratiquement depuis 1976
- rejet démocratique du nucléaire (débat + parlement : mars 1985)
- baisse continue de consommation EP :
 - DK: 46,4 MWh/hab (1972) → 38,8 MWh (3,34 tep)/hab (2012)
 - 3,21 tep/hab (2016)
 - F: 41,2 MWh/hab (1972) → 46,3 MWh (3,98 tep)/hab (2012)
 - 3,84 tep/hab (2016)
- forte baisse des émissions GES (hors UTCF) :
 - DK: 15,6 tCO₂éq/hab (1972) → 13,4 tCO₂éq/hab (1990)
 - 8,4 tCO₂éq/hab (2016) ► -36,9% par rapport à 1990
 - F: 9,6 tCO₂éq/hab (1990) → 6,9 tCO₂éq/hab (2016)^(*)
 - -28,1% par rapport à 1990
- efficacité économique : PIB/hab $\frac{DK}{F}_{2016} = 1,45$
 - DK 174,2 tCO₂éq/M€PIB France: 207,8 tCO₂éq/M€PIB (+19,3%)

(*) calcul officiel à 4 gCO₂éq/kWhe nucléaire

source: Danish Energy Agency

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

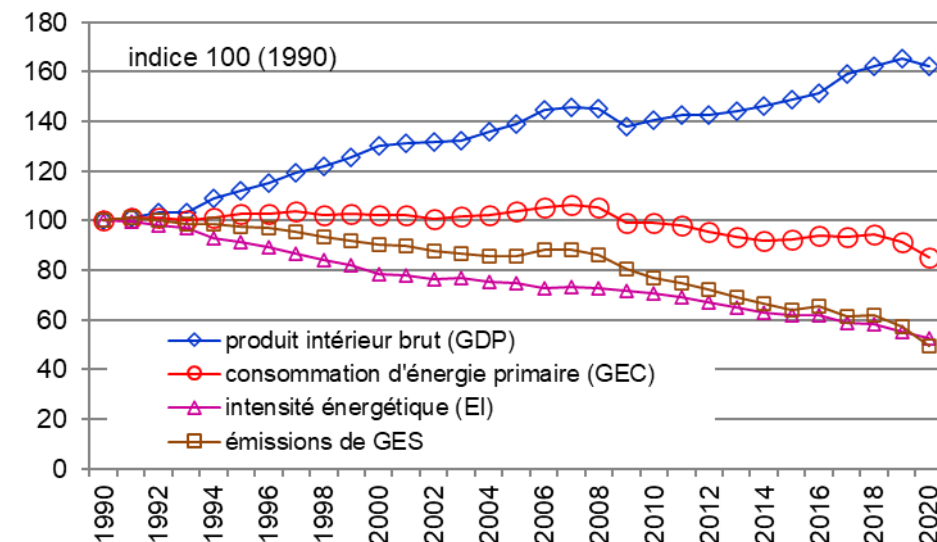


3. retours d'expérience du Danemark

l'exemple danois (suite)

- grande efficacité énergétique **EF/EP** (2016) = **83,8%** (France: 59,7%)
- faible intensité énergétique **IEP** (2016) = **0,771 kWh/€PIB**
(France 1,34 kWh/€PIB $\approx \times 1,74$ Danemark)
- 1^{er} producteur mondial éolien/habitant: **2230 kWh/hab** en 2016
(France 320 kWh/hab)
- premiers parcs éoliens offshore
- électricité renouvelable + cogénération
 - cogénération = **55,6% de la production électrique** (France 3%)
 $\approx 100\%$ de l'électricité hors éolien et photovoltaïque
 - cogénération $\approx 66,5\%$ de la chaleur des réseaux de chaleur
 - cogénération → **rendement > 90%** (50% électr. + 40% chaleur)
 - électricité renouvelable variable **60,9%** (2020) (France: 10,4%)
 - EnR = **82,3% électricité** (2020) (France: 25,0%)
 - électricité éolienne **56,8%** (2020) (France: 7,9%)
- réseaux de chaleur **64%** chauffage (2020)
- indépendance énergétique élevée **90%** (France: 10%)
- part élevée des ENR: **40,4% EP** (2020) ajustée des imports/exports
(France 13,5%)

source: Danish Energy Agency



3. retours d'expérience du Danemark

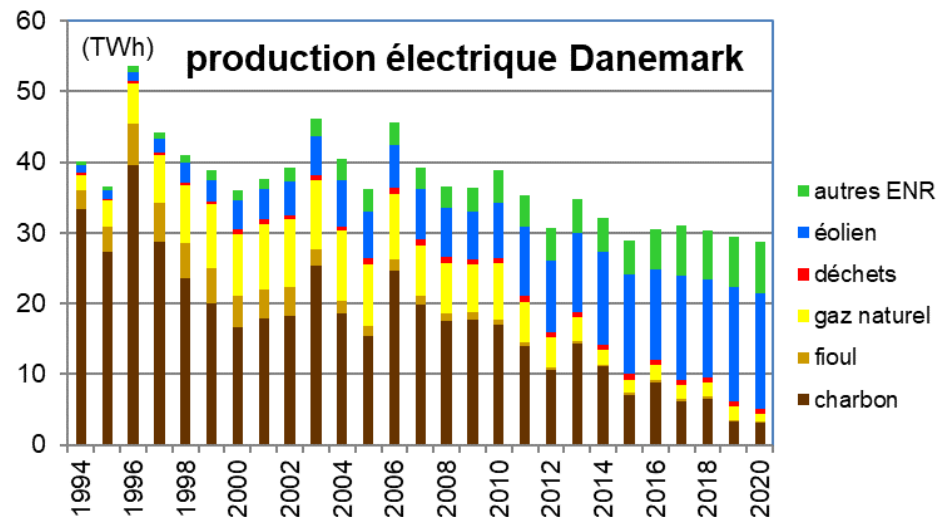
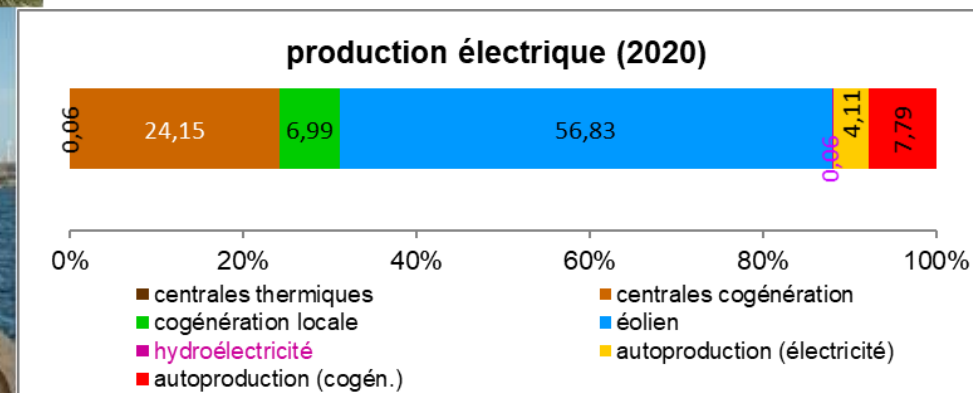
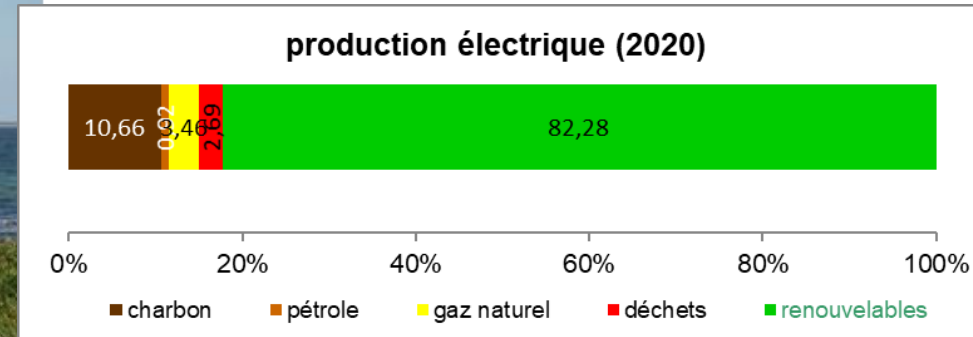
l'exemple danois (suite)

production électricité

- **cogénération généralisée**
dont ENR biomasse (28,1% CHP; 55,4% chp)
- **forte pénétration éolien + photovoltaïque**
▶ **90% éoliennes propriété citoyenne & publique**
(coopératives, municipalités, fermiers, individus)
- **élimination progressive fioul, gaz et charbon**



source: Danish Energy Agency



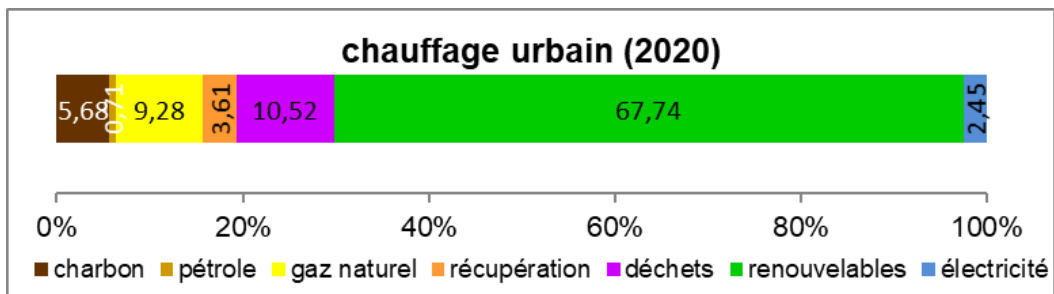
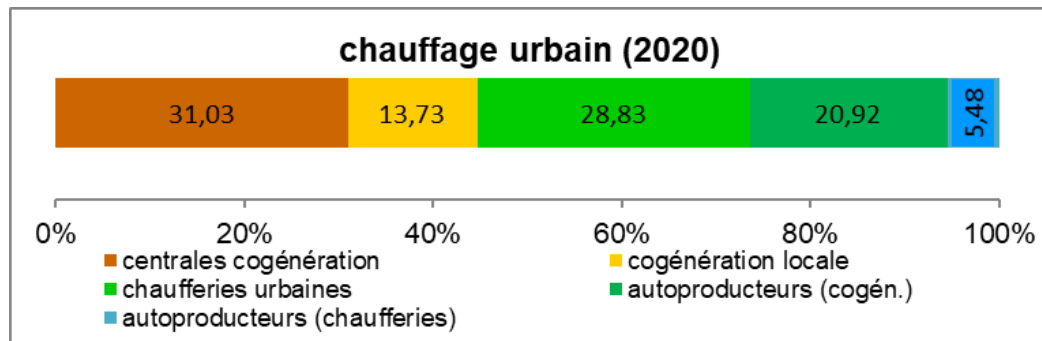
3. retours d'expérience du Danemark

l'exemple danois (suite)

production chaleur 2016

- réseaux de chaleur généralisés
 - ENR 68%
 - 64% résidentiel
 - 71,0% tertiaire (commerces, services)
- cogénération ► 65,7% réseaux de chaleur

solaire thermique
systématique (20-50%):
Aalborg, Smørum, Gram



Source:
Danish Energy Agency



◀ DH_Mårup (Samsø)

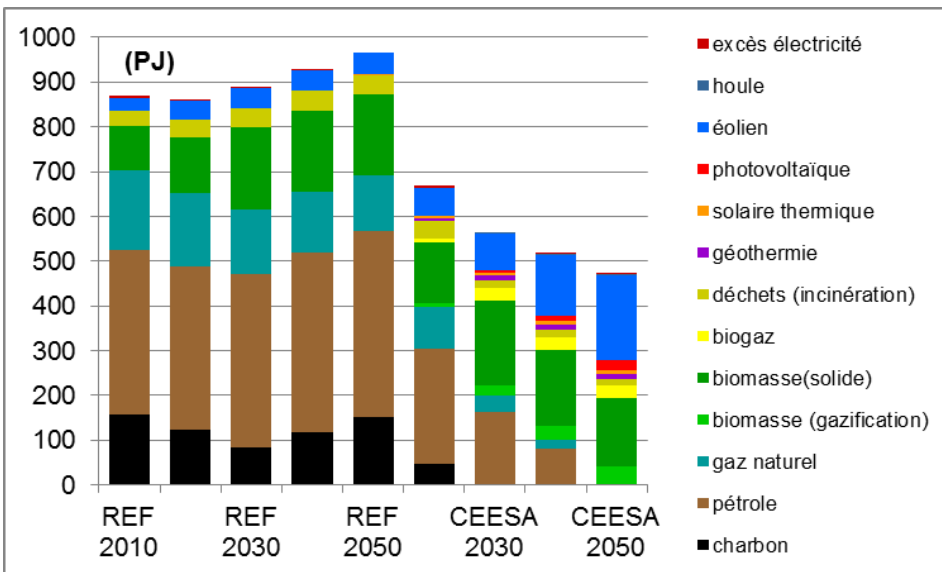


▼ CHP-DH Gråsten

3. retours d'expérience du Danemark

l'exemple danois (suite)

- **planification nationale 100% renouvelable 2050**
 - 35% consommation d'énergie finale = EnR en 2020
 - 50% électricité = éolien en 2020 *déjà réalisés*
 - 100% électricité et chaleur = EnR 2035
 - 100% énergie = EnR en 2050
- **mise en place des Smart Energy Systems**
 - réseaux électricité + chaleur + froid + gaz couplés
 - 50% électricité = éolien en 2020



5a. Marstal plant (33300 m²)



5b. Vojens plant (70000 m²)



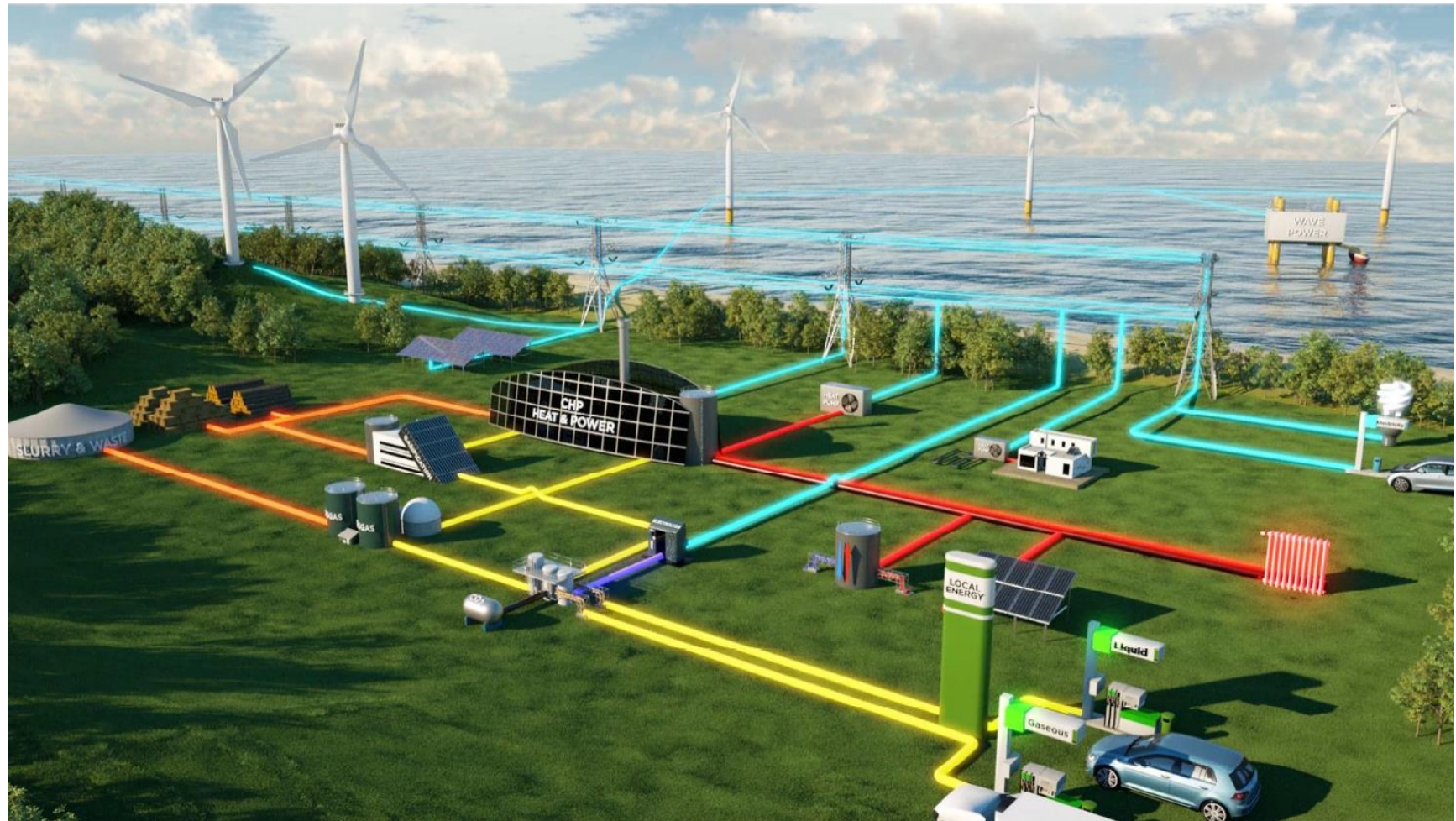
3. retours d'expérience du Danemark

l'exemple danois (suite)

- la réglementation éolienne danoise au service du contrôle citoyen local
« *Renewable Energy Act* » (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 durant le processus
 - ▶ oblige à ouvrir au moins 20% des parts des installations éoliennes prioritairement aux citoyens habitant à moins de 4,5 km ; tout citoyen des communes d'implantation peut aussi 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 € / projet pour 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

4. structure et analyse des SERI

le Smart Energy System danois¹



¹ Smart Energy Systems for coherent 100% renewable energy and transport solutions planning, B.V. Mathiesen et al., Applied Energy 145 (2015) 139–154

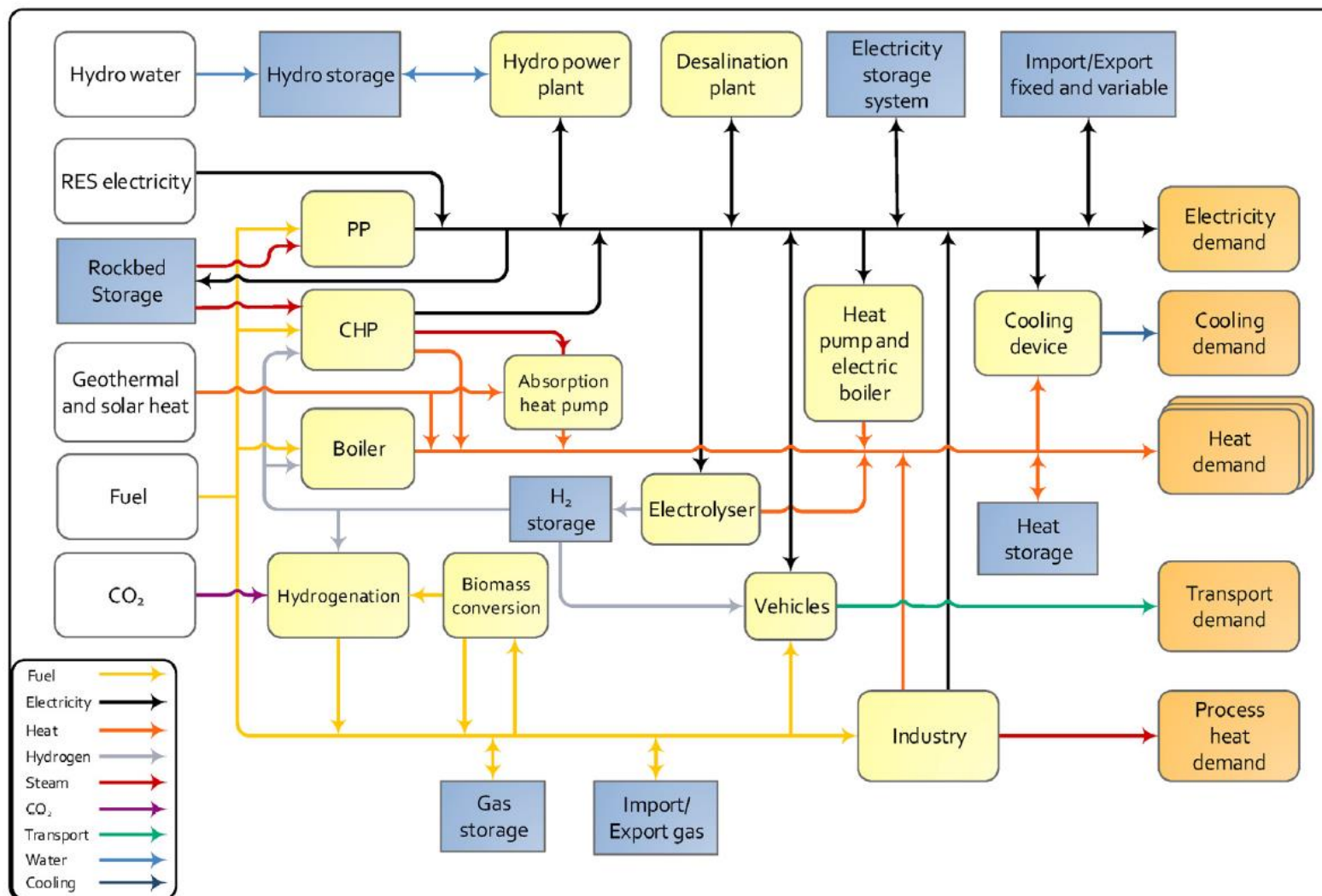
4. structure et analyse des SERI

Systèmes Energétiques Renouvelables Intelligents (SERI)

- **couplage complet des réseaux décentralisés d'électricité – chaleur – froid – gaz – mobilité électrique** aux échelles locales (communes, cantons, régions), *y compris couplages intersectoriels* (industriel, tertiaire, résidentiel, transports)
- couplage des réseaux d'énergie décentralisés aux **stockages multi-énergies multi-échelles**
- couplage des réseaux énergétiques intelligents décentralisés aux **réseaux nationaux et internationaux**
 - ▶ **stabilité et sécurité des réseaux** (*confirmation Danemark, Irlande, Allemagne, Islande, Autriche, etc.*)
 - ▶ intégration massive des **EnR électriques, thermiques et combustibles**
 - ▶ développement et extension massive des **réseaux de chaleur et de froid 4G et 5G**
→ récupération massive des rejets de chaleur industries, commerces, datacenters
 - ▶ **adaptation optimisée des ressources** (puissances disponibles de chaque réseau + stockages disponibles) par décalage – effacement automatisable de la demande en fonction de la production, des stockages
 - ▶ très grande **économie générale d'investissement en stockages** (*voir Danemark*)
 - ▶ **économie d'électricité**, moindre besoin d'interconnexions électriques internationales
 - ▶ **économie de biomasse** (préservation des équilibres biologiques des sols, de la biodiversité)
 - ▶ **limitation - disparition des unités de back-up** grâce aux stockages, au pilotage, aux cogénérations, aux complémentarités-foisonnement des EnR

4. structure et analyse des SERI

Systèmes Energétiques Renouvelables Intelligents (SERI)



- couplages inter-réseaux
- couplages des stockages
- couplages des transports

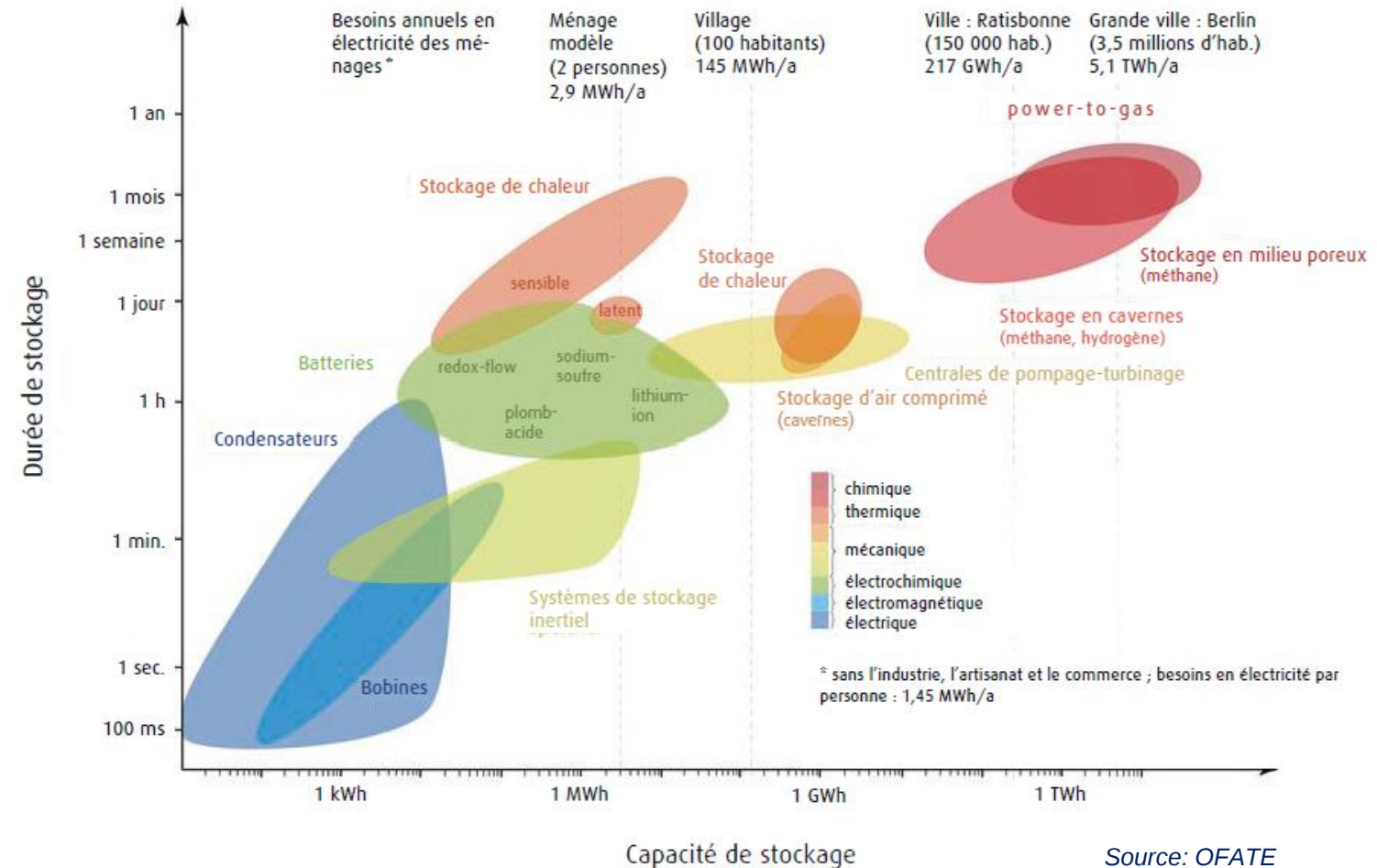
exemple: mobilité électrique

- élimination des combustibles fossiles
- stockage massif des EnR électriques variables (10 kWh/véhicule × 10 millions de véhicules = 100 GWh disponibles en stockage-déstockage pendant 90% du temps par services V2G)
- réduction puissante des GES transport
- élimination des pollutions atmosphérique (microparticules, imbrûlés, oxydes d'azote, CO, ozone, etc.)

4. structure et analyse des SERI

SERI

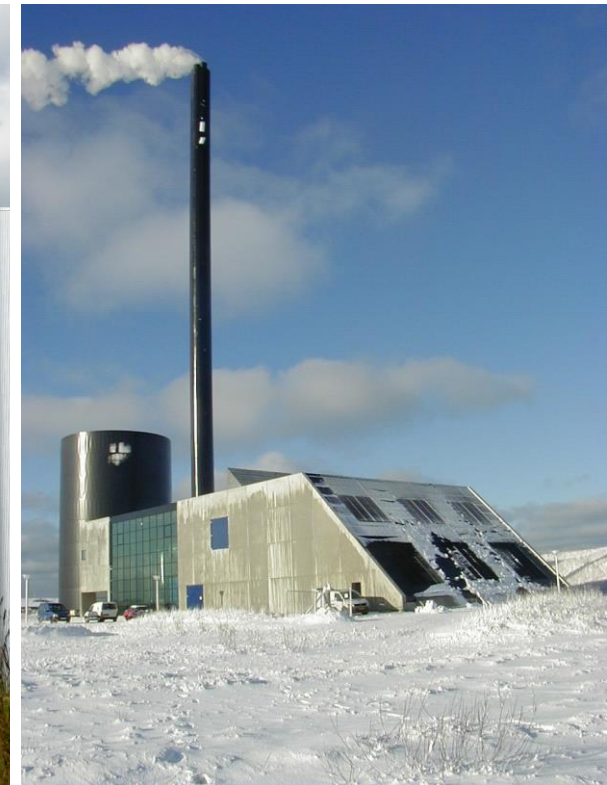
- stockage multi-énergies multi-échelles
 - échelle de temps
 - échelle de capacité



4. structure et analyse des SERI

SERI

- stockage thermique avancé
 - journalier (réservoirs eau chaude isolés)
 - hebdomadaire (tuyaux des réseaux de chaleur 4-5G)
 - saisonnier (voir Danemark):
 - grands puits souterrains (PTES)
 - grands réservoirs d'eau souterrains (TTES)
 - nappes poreuses souterraines (ATES)

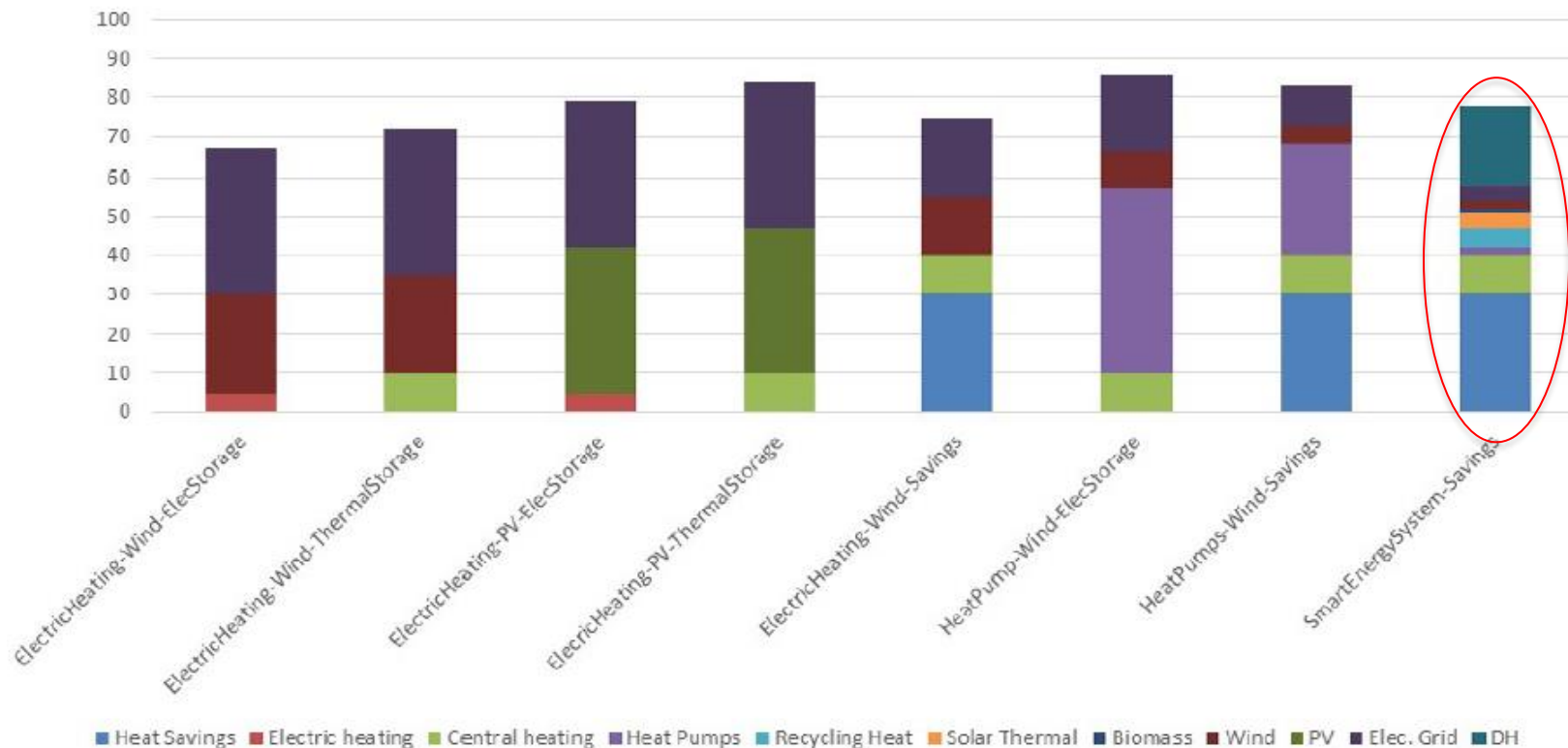


4. structure et analyse des SERI

le Smart Energy System danois

- le rôle essentiel du stockage multi-échelle, multi-énergie
 - comparaison de différentes stratégies de transformation du secteur du chauffage en future solution 100% EnR
 - ▶ coût total élevé des reseaux d'énergie séparés → coûts moindres des SES + sobriété sans stockage

Investments in Billion EUR (without storage cost)

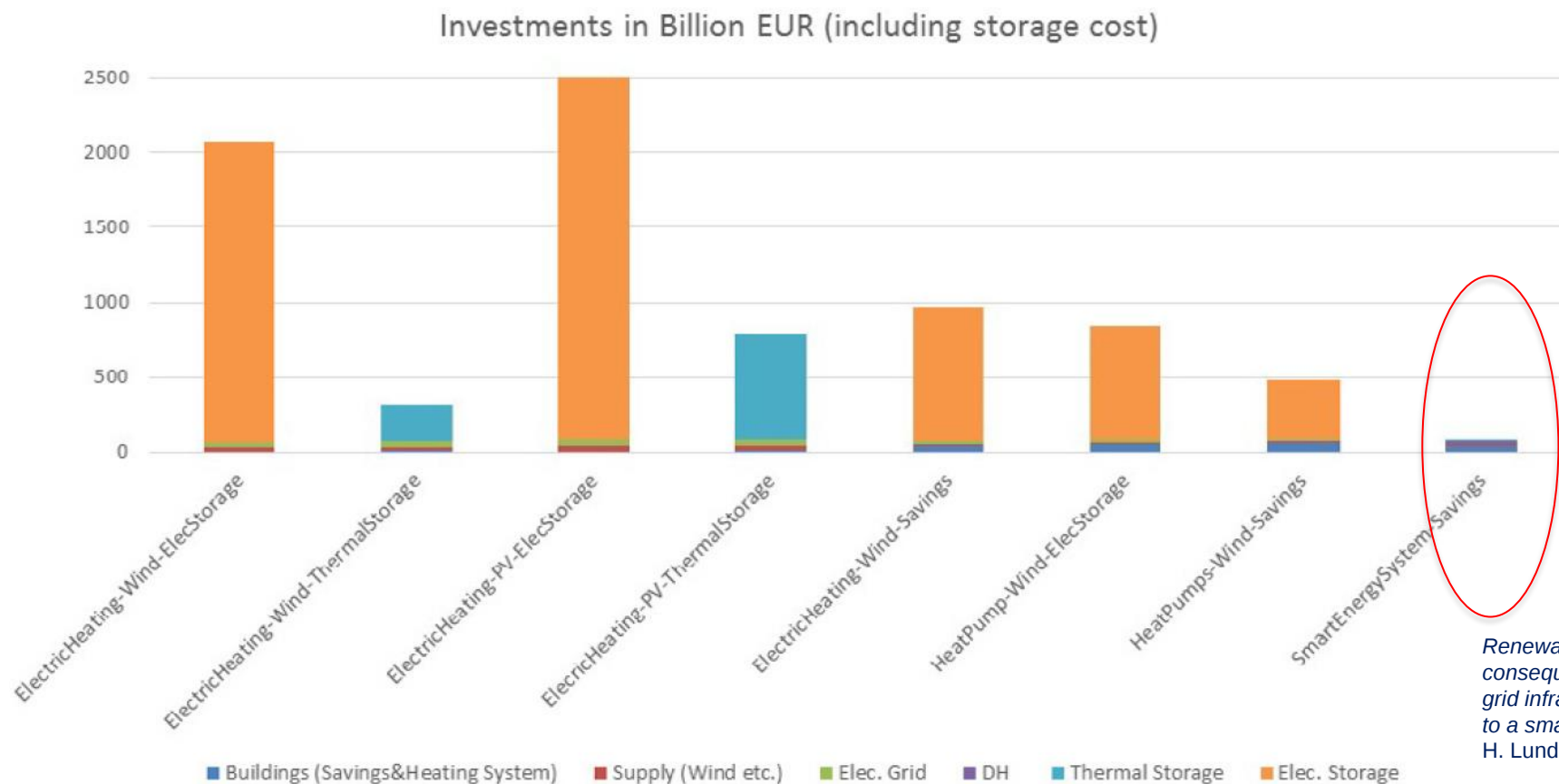


Renewable heating strategies and their consequences for storage and grid infrastructures comparing a smart grid to a smart energy systems approach, H. Lund, Energy 151 (2018) 94-102

4. structure et analyse des SERI

le Smart Energy System danois

- le rôle essentiel du stockage multi-échelle, multi-énergie
 - coût total très faible des SES avec stockage



Renewable heating strategies and their consequences for storage and grid infrastructures comparing a smart grid to a smart energy systems approach, H. Lund, Energy 151 (2018) 94-102



éléments d'information

Travaux recherche:

étude de la transition énergétique du Danemark :

<http://www.global-chance.org/IMG/pdf/gc38p17-55.pdf>

la chaleur et le froid dans la transition énergétique :

<https://doi.org/10.25855/SFT2020-133>

plans et méthodologie de la transition énergétique locale et nationale :

<https://www.researchgate.net/publication/331970450> PROPOSITIONS POUR LA TRANSITION ENERGETIQUE DANS LE HAUT-RHIN ET LE TERRITOIRE DE BELFORT APRES FERMETURE DEFINITIVE DE LA CENTRALE NUCLEAIRE DE FESSENHEIM

<https://www.researchgate.net/publication/330912552> VERS UN SYSTEME ENERGETIQUE EFFICACE POUR LA FRANCE - CONTRIBUTION AU DEBAT PUBLIC PPE Towards an efficient energy system for France - contribution to the French public debate on the Multiannual Energy

PSDM (plancher solaire direct mixte) en habitat bioclimatique :

<https://www.researchgate.net/publication/24148319> Plancher solaire direct mixte a double r'eseau en habitat bioclimatique - Conception et bilan thermique r'eel Double direct solar floor heating in boclimatic habitation - Design and real energetical b

nucléaire

http://cpdp.debatpublic.fr/cpdp-cigeo/_script/ntsp-document-file_downloadadda21.pdf?document_id=157&document_file_id=165

http://cpdp.debatpublic.fr/cpdp-cigeo/_script/ntsp-document-file_download8fba.pdf?document_id=158&document_file_id=166

<https://www.global-chance.org/Vieillissement-des-aciers-sous-irradiation>

Convention Citoyenne pour le Climat :

<https://energiesocieteecologie.home.blog/2020/05/20/lettre-a-la-convention-citoyenne-pour-le-climat-la-conscience-des-choix-doit-guider-la-relance-et-les-investissements/>

<https://www.global-chance.org/Lettre-a-la-Convention-Citoyenne-pour-le-Climat-et-aux-parlementaires>

l'énergie solaire thermique dans les systèmes énergétiques renouvelables intelligents :

(À paraître)



Merci pour votre attention