

formation continue universitaire

Valorisation de la géothermie :

Le rôle clé des réseaux de chaleur

**Statistiques Energétiques et Géothermiques,
résultats du projet Geothermal District Heating (GeoDH) et
types de valorisation de la géothermie**

J. Faessler

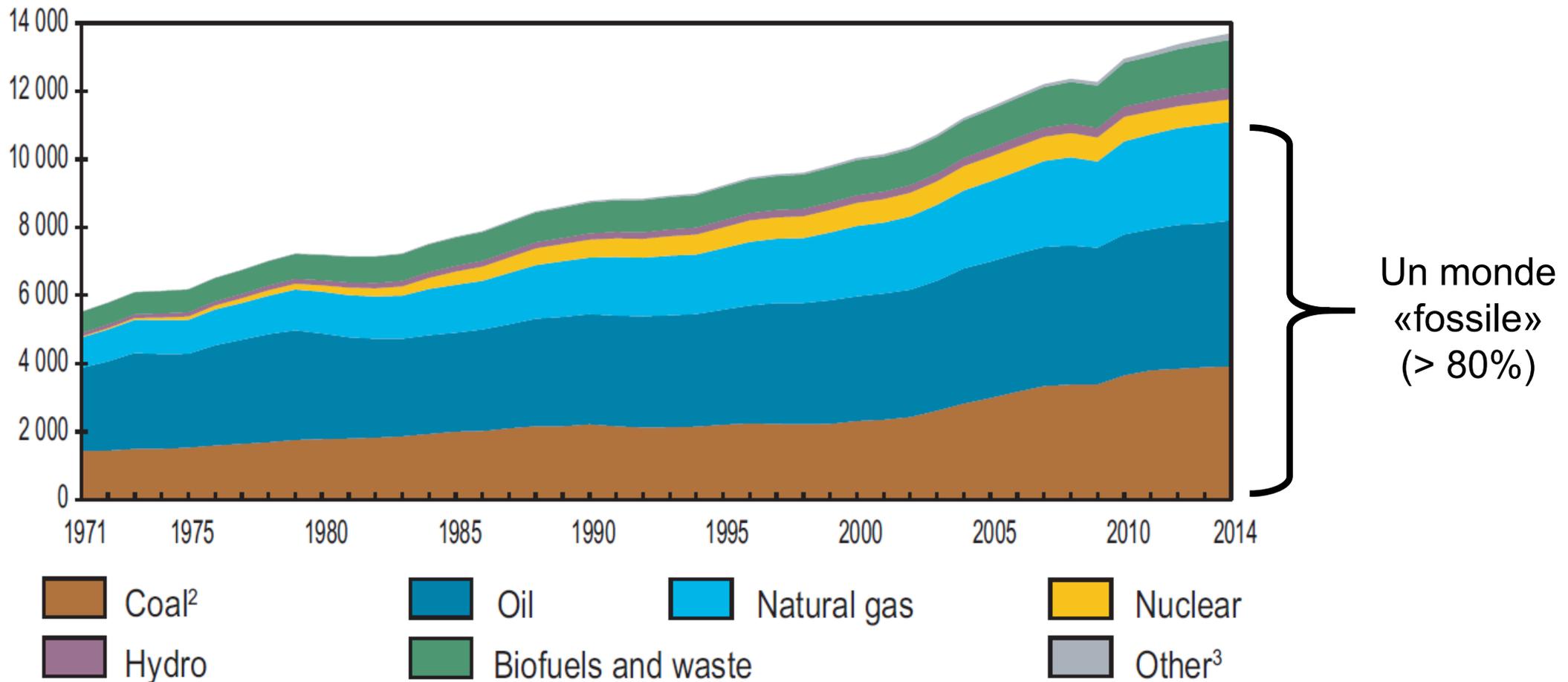
3 novembre 2016

www.unige.ch/energie

www.unige.ch/formcont/geodh/

Energie primaire mondiale

World¹ total primary energy supply (TPES) from 1971 to 2014 by fuel (Mtoe)



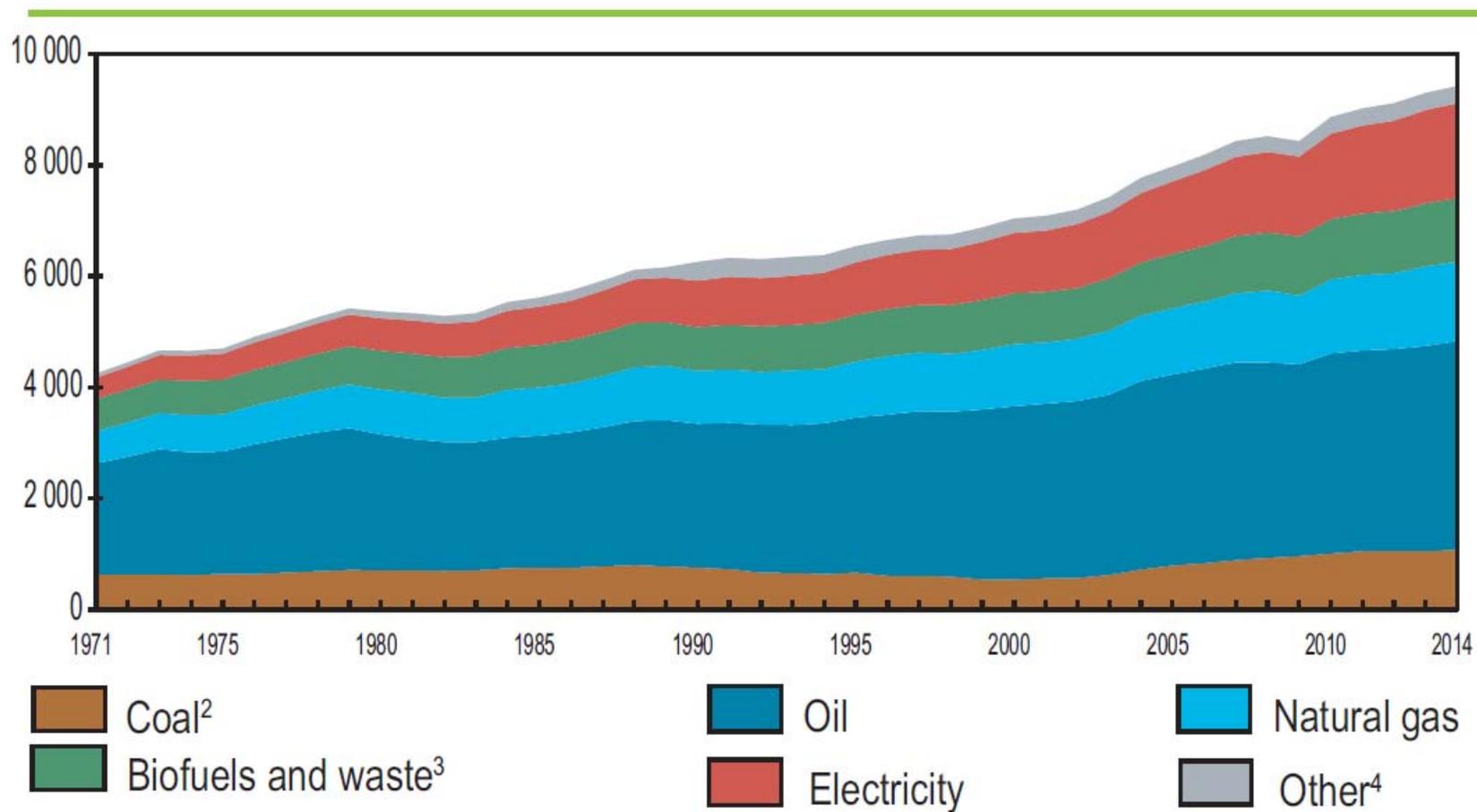
1. World includes international aviation and international marine bunkers.

2. In these graphs, peat and oil shale are aggregated with coal.

3. Includes geothermal, solar, wind, heat, etc.

Energie finale mondiale

World¹ total final consumption from 1971 to 2014
by fuel (Mtoe)



Rendement global
($E_{\text{finale}}/E_{\text{primaire}}$)
= 69% en 2014
(76% en 1973)

Electricité < 22%
($2/3$ des pertes du
système)

1. World includes international aviation and international marine bunkers.

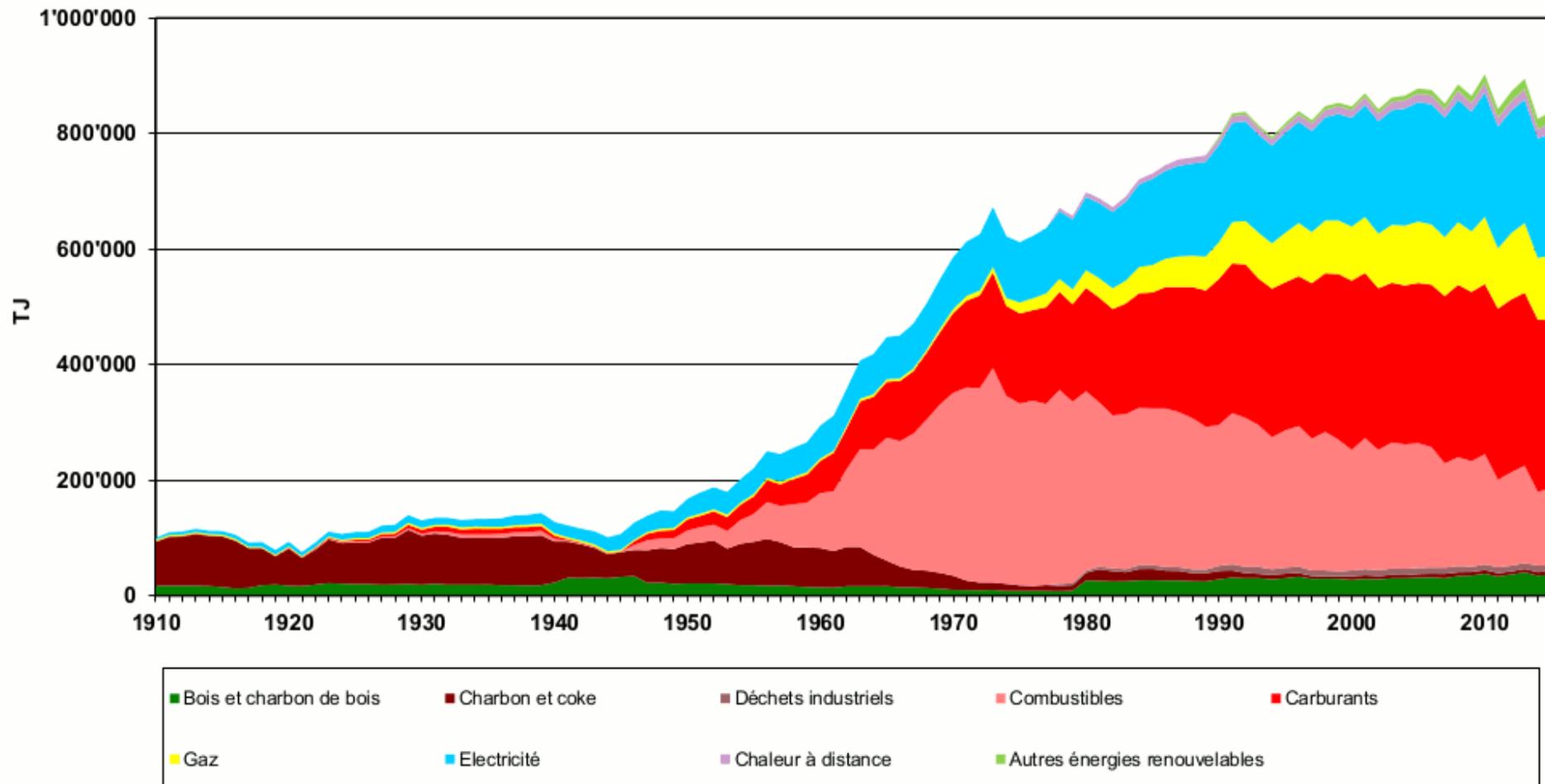
2. In these graphs, peat and oil shale are aggregated with coal.

3. Data for biofuels and waste final consumption have been estimated for a number of countries.

4. Includes geothermal, solar, wind, heat, etc.

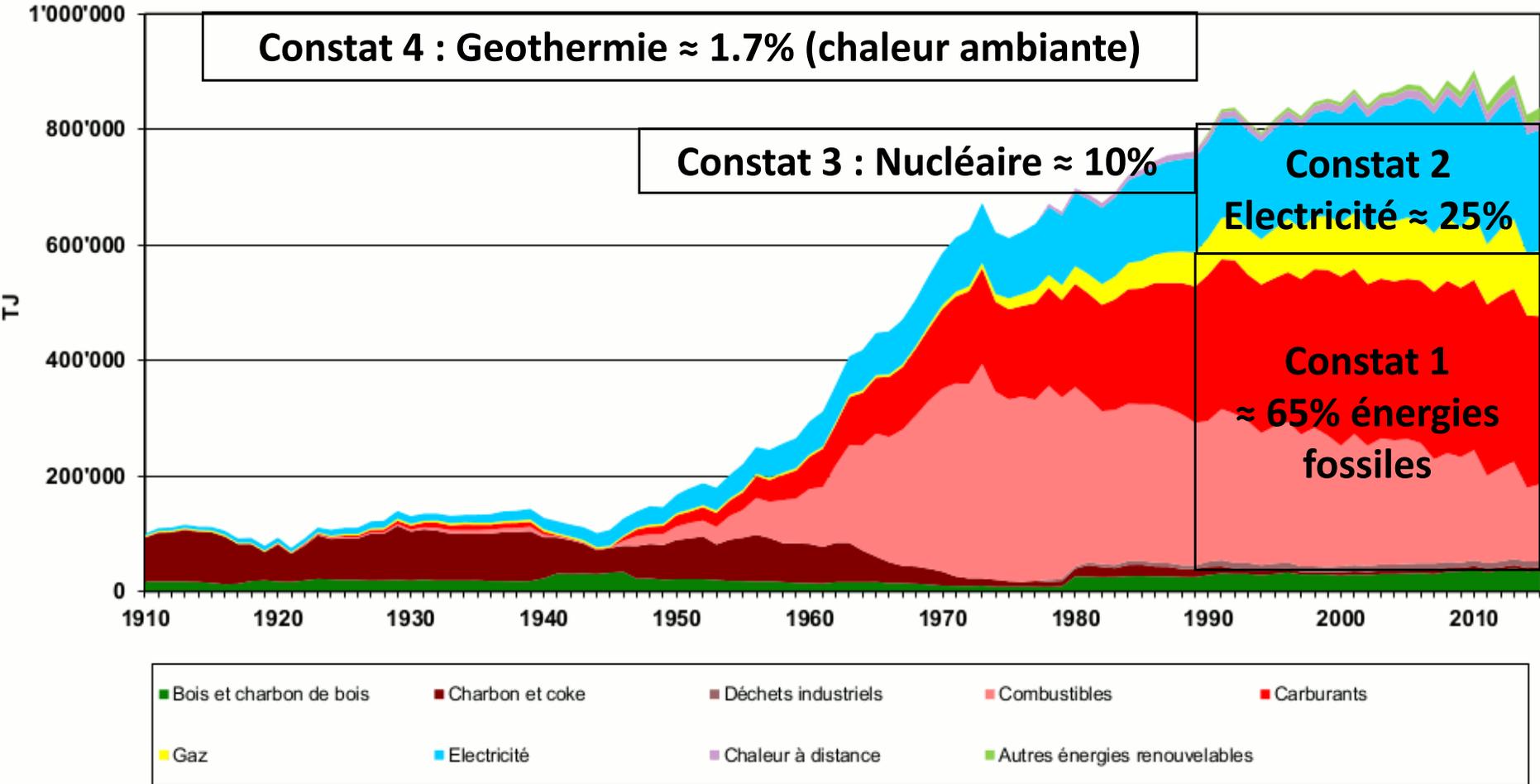
Statistiques Énergétiques Suisse

Consommation finale de 1910 à 2015 selon les agents énergétiques



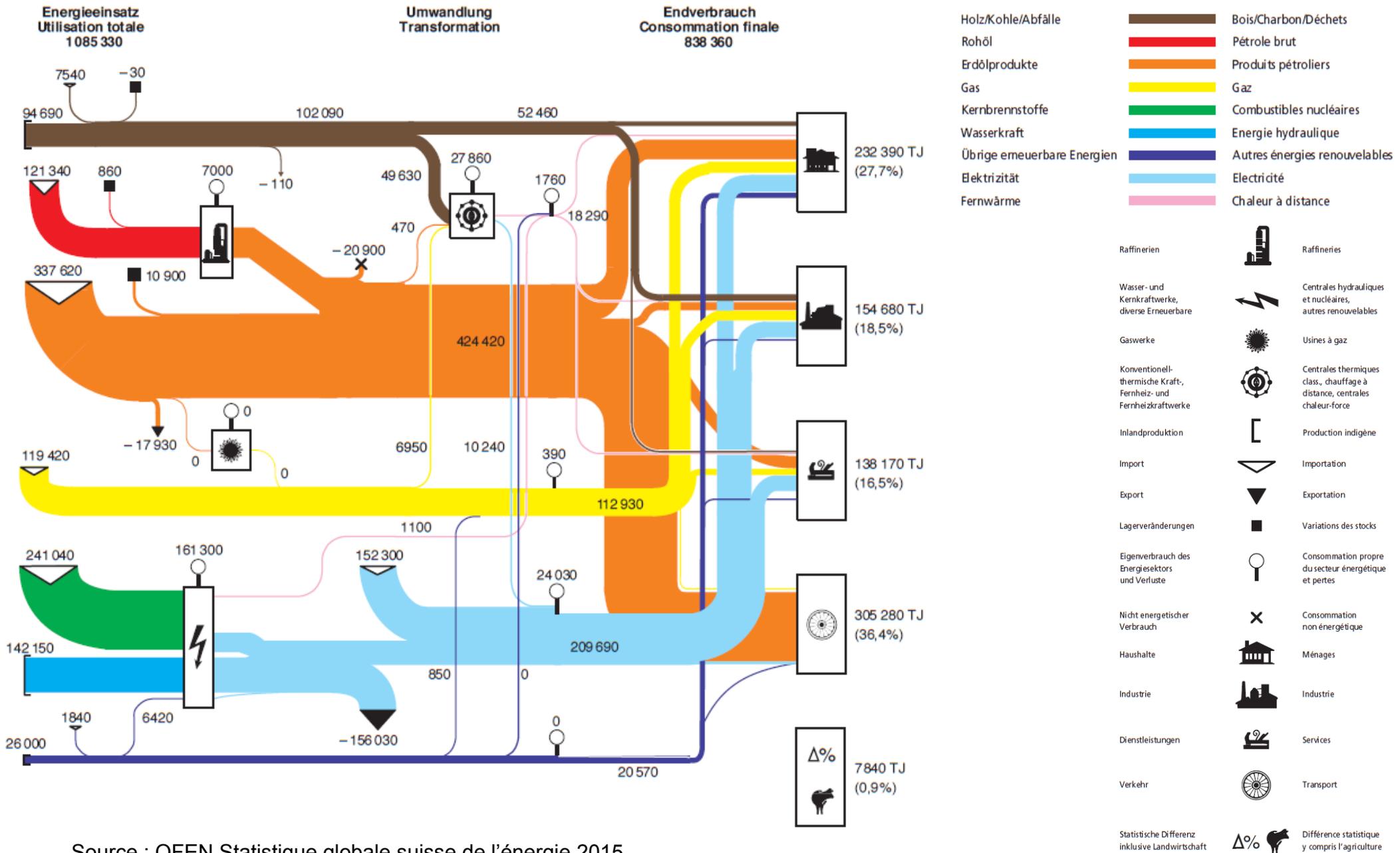
Statistiques Énergétiques Suisse

Consommation finale de 1910 à 2015 selon les agents énergétiques

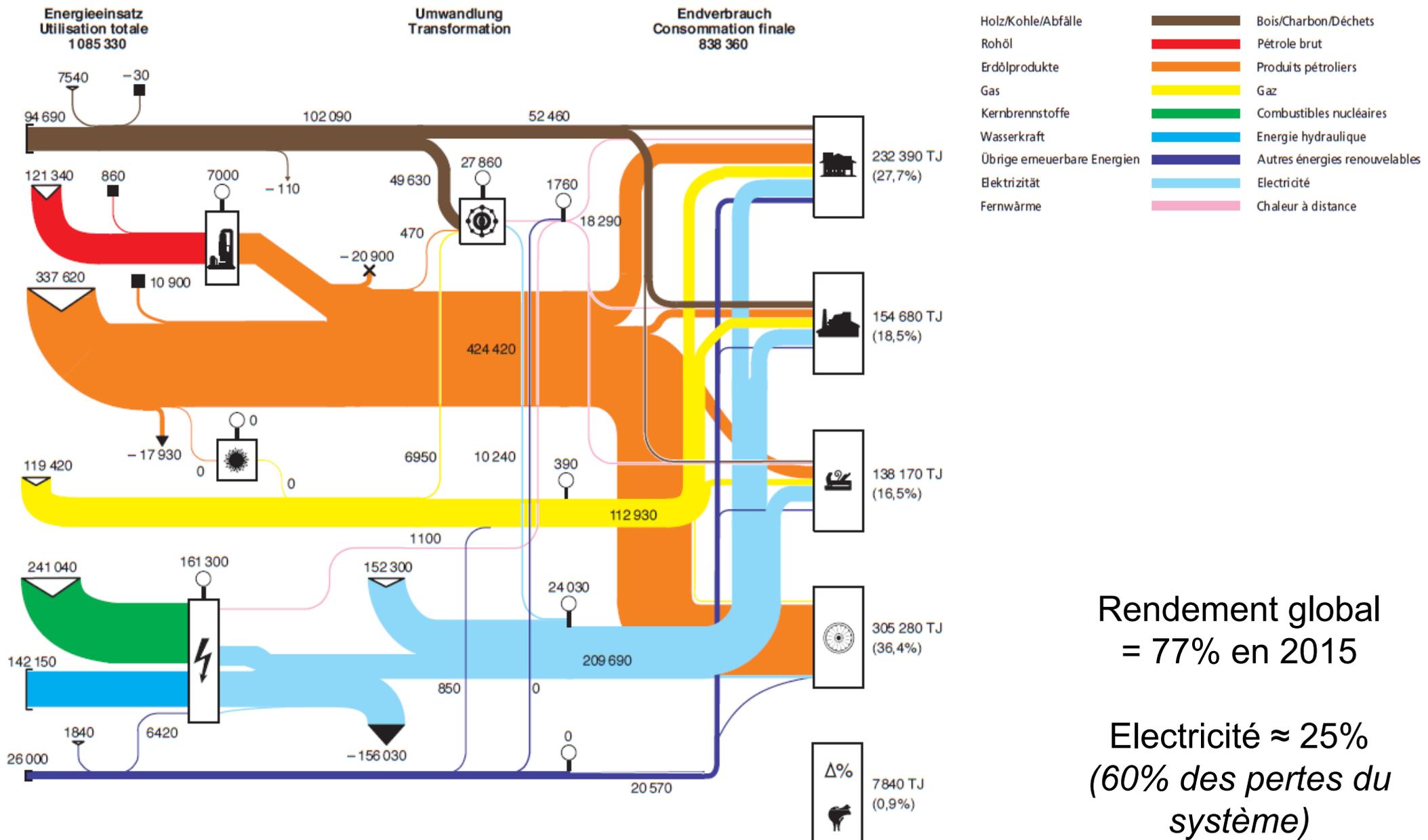


Source <http://www.energiestatistik.ch>

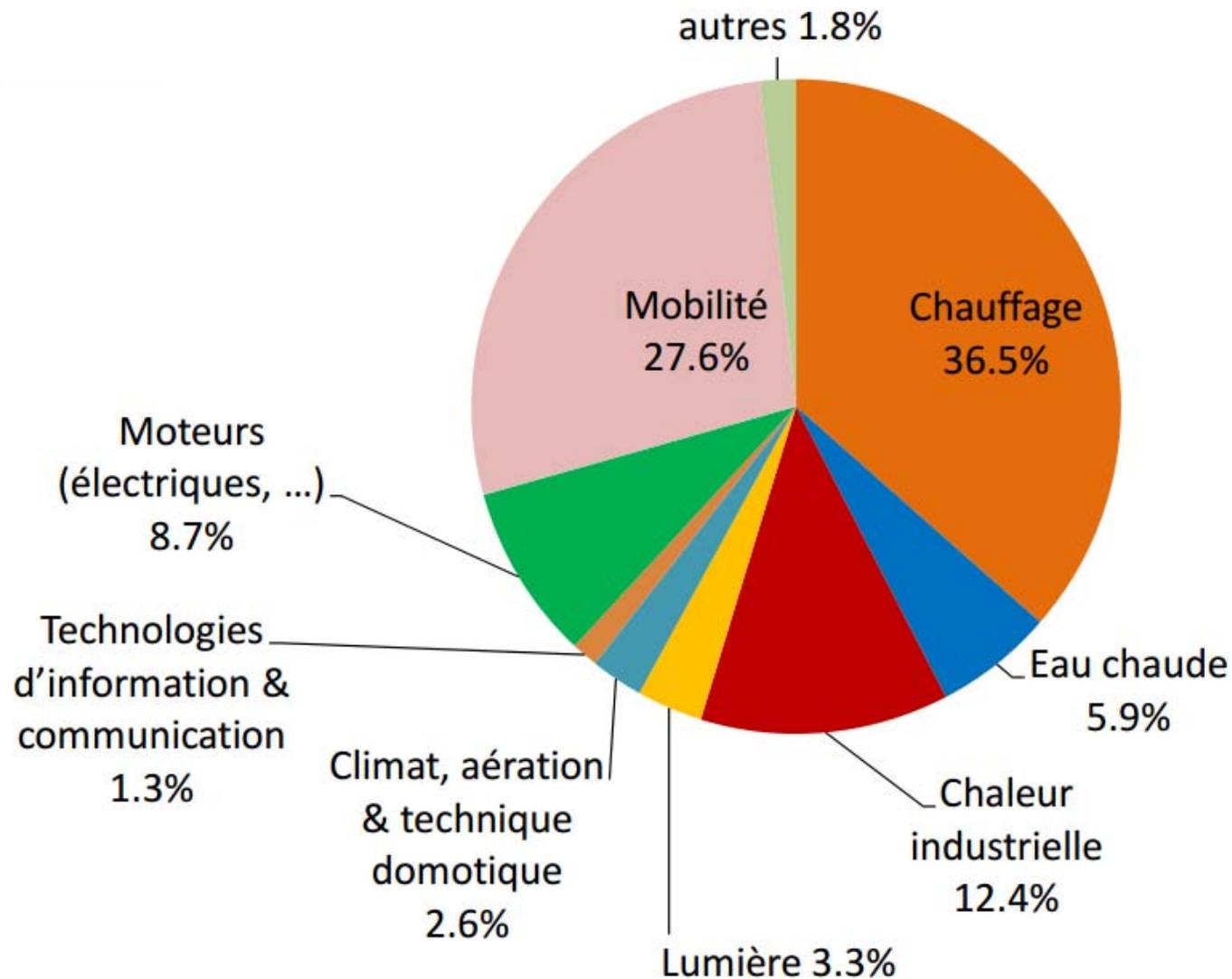
Flux énergétique de la Suisse 2015



Flux énergétique de la Suisse 2015



Caractéristique de la demande en Suisse

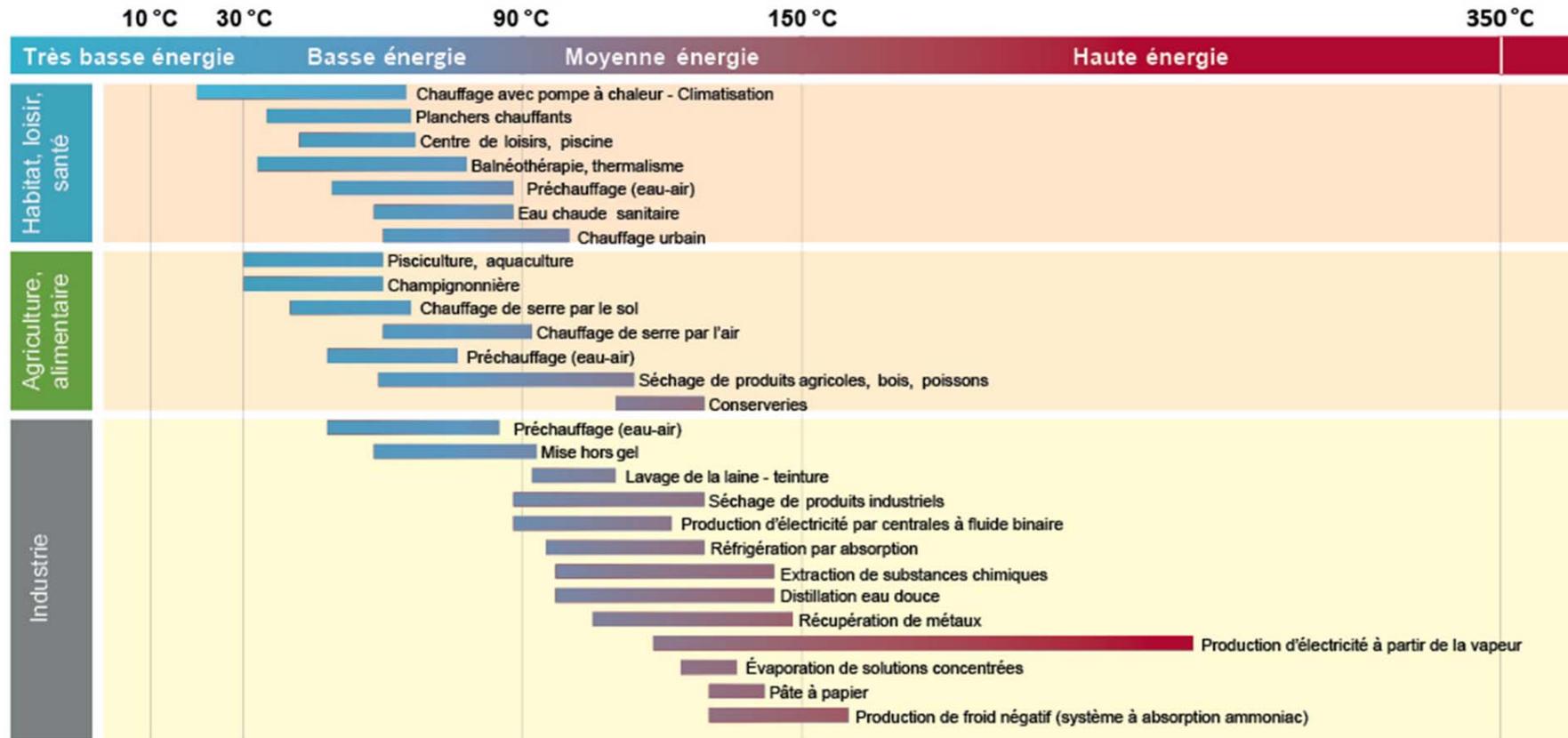


- Une inertie historique
 - Un Monde «fossile» (> 80%)
 - Biomasse = 1^{ère} ressource renouvelable mondiale (CH = hydroélectrique)
 - Nucléaire «faible» (2% E_{finale} au niveau mondial, 10% en CH)
 - 1^{er} usage = chaleur !
- Comment «comptabiliser» les économies d'énergies et certaines énergies renouvelables (i.e. chaleur ambiante) ?

Les usages de la géothermie

Température de la ressource

Type d'usages

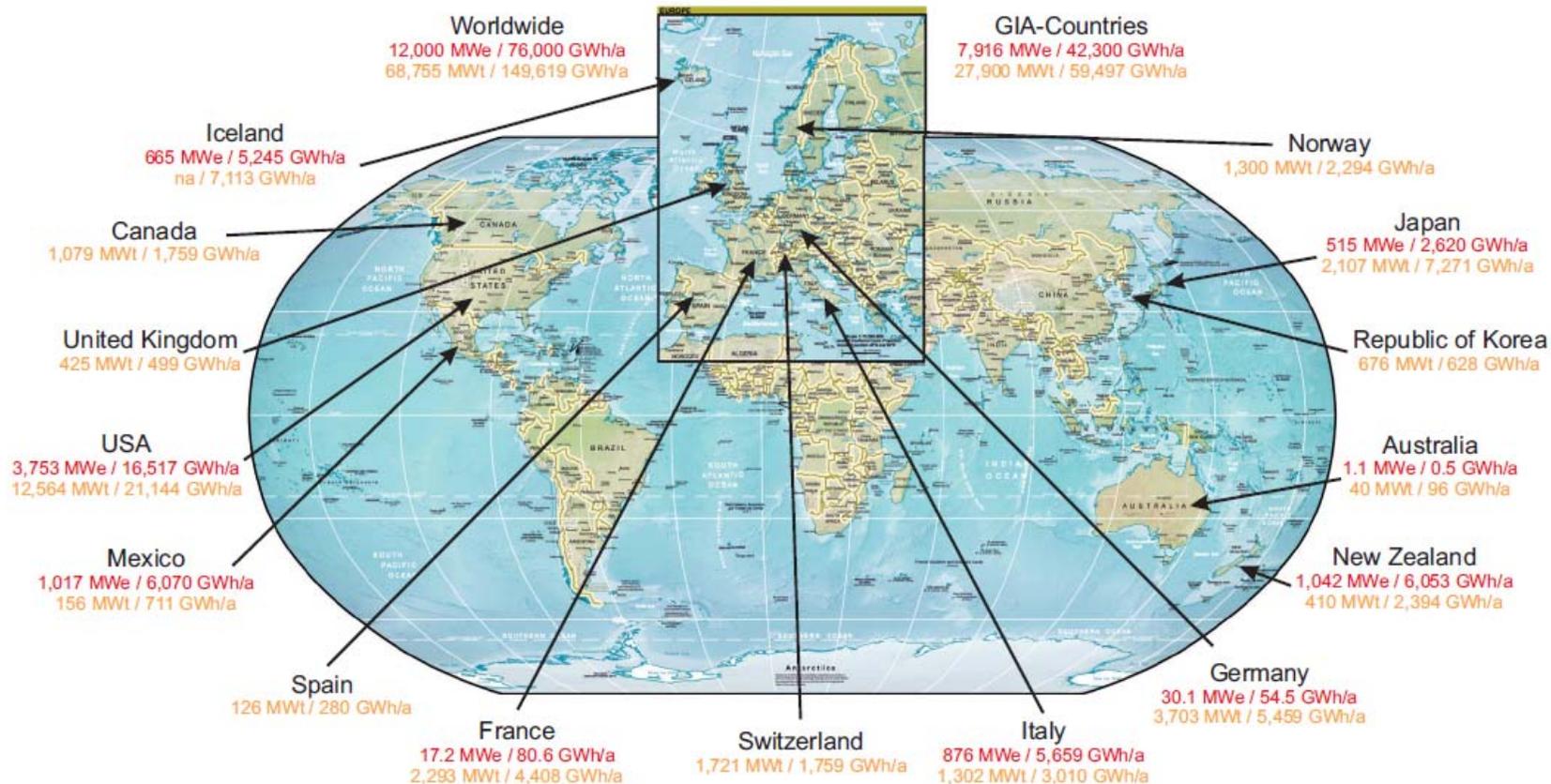


Source : ADEME/BRGM

Statistiques selon l'usage :

- Electricité
- Chaleur directe
- Chaleur avec pompes à chaleur (PAC)

Statistiques géothermiques 2013



76 TWh **électrique** correspond à 0.4% de la consommation d'électricité mondiale

150 TWh **chaleur** correspond à environ 0.4% de la consommation de chaleur mondiale

Figure 3: Overview of geothermal power (red) and heat (orange) utilization in GIA countries and worldwide 2013. Heat related data includes direct uses as well as GSHPs. Country data from GIA Annex X country reports 2013; world data for power based on estimates made in the Global Status Report of REN21 (2014); world data for heat based on numbers for 2010 (Lund, 2011) assuming an annual growth rate of 12 % (capacity) and 8 % (heat produced), respectively. Map: The World Factbook 2013, CIA (www.cia.gov).

Géothermie : tendances 2000-2013

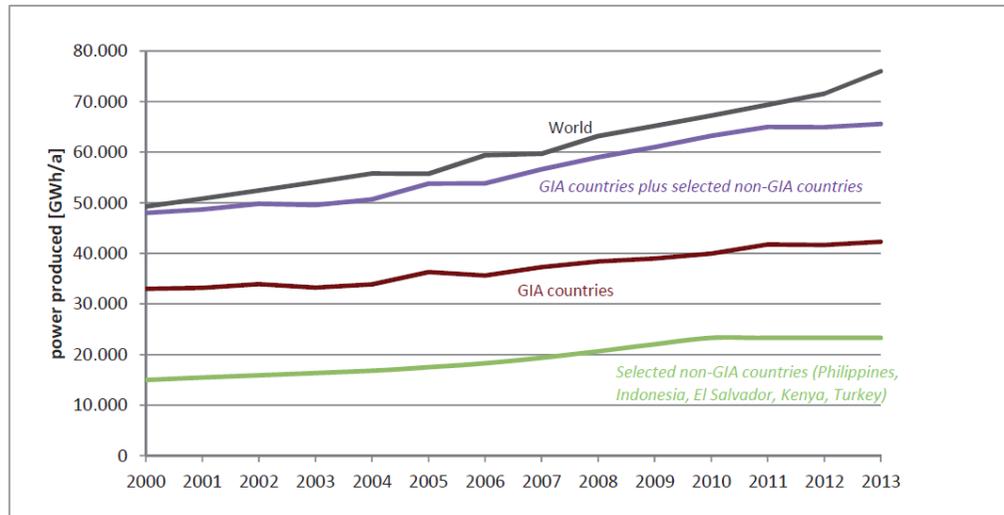


Figure 9: Geothermal power generation in GIA countries, selected non-GIA countries and worldwide 2000 - 2013.

Electricité x 1.5

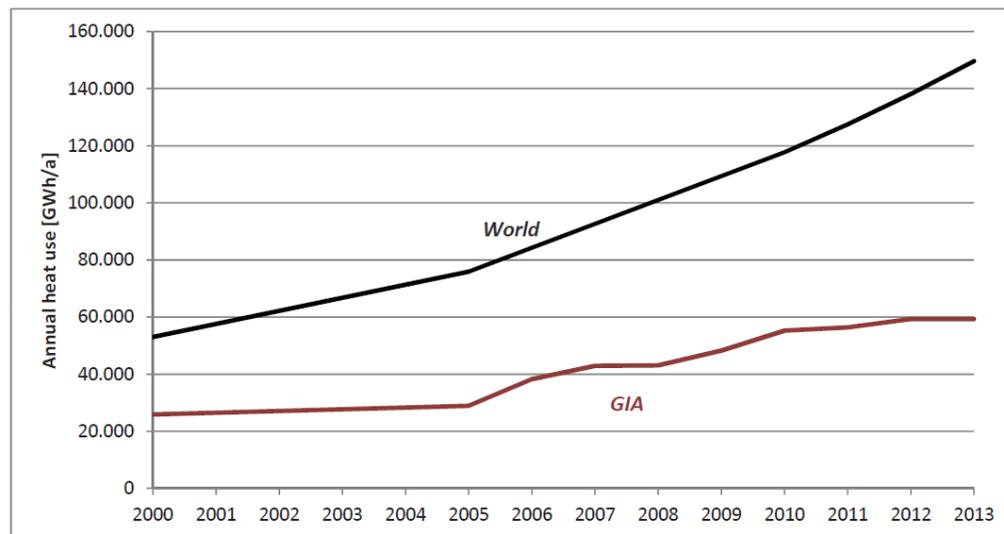


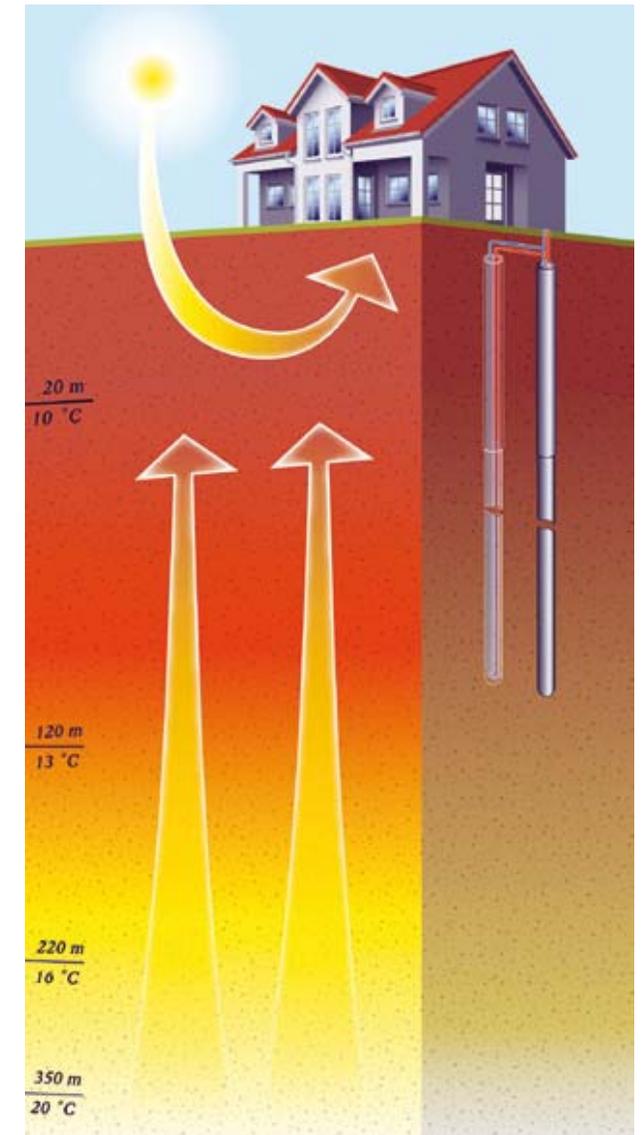
Figure 13: Annual heat use (GWh/year; direct use and GHP) in GIA countries and worldwide 2000 - 2013. Figure based on data from Lund & Freeston (2001) and Lund et al. (2005 and 2011); GIA Annual reports (Executive Summaries) 2007, 2008 and 2009 and GIA Annex X country reports 2010 to 2013; world 2011 to 2013 extrapolated assuming a CAGR of 8 %.

Chaleur x 3

(en 2010, environ la moitié de la chaleur fournie via la chaleur directe, l'autre moitié via des PAC)

Basse enthalpie – PAC géothermique

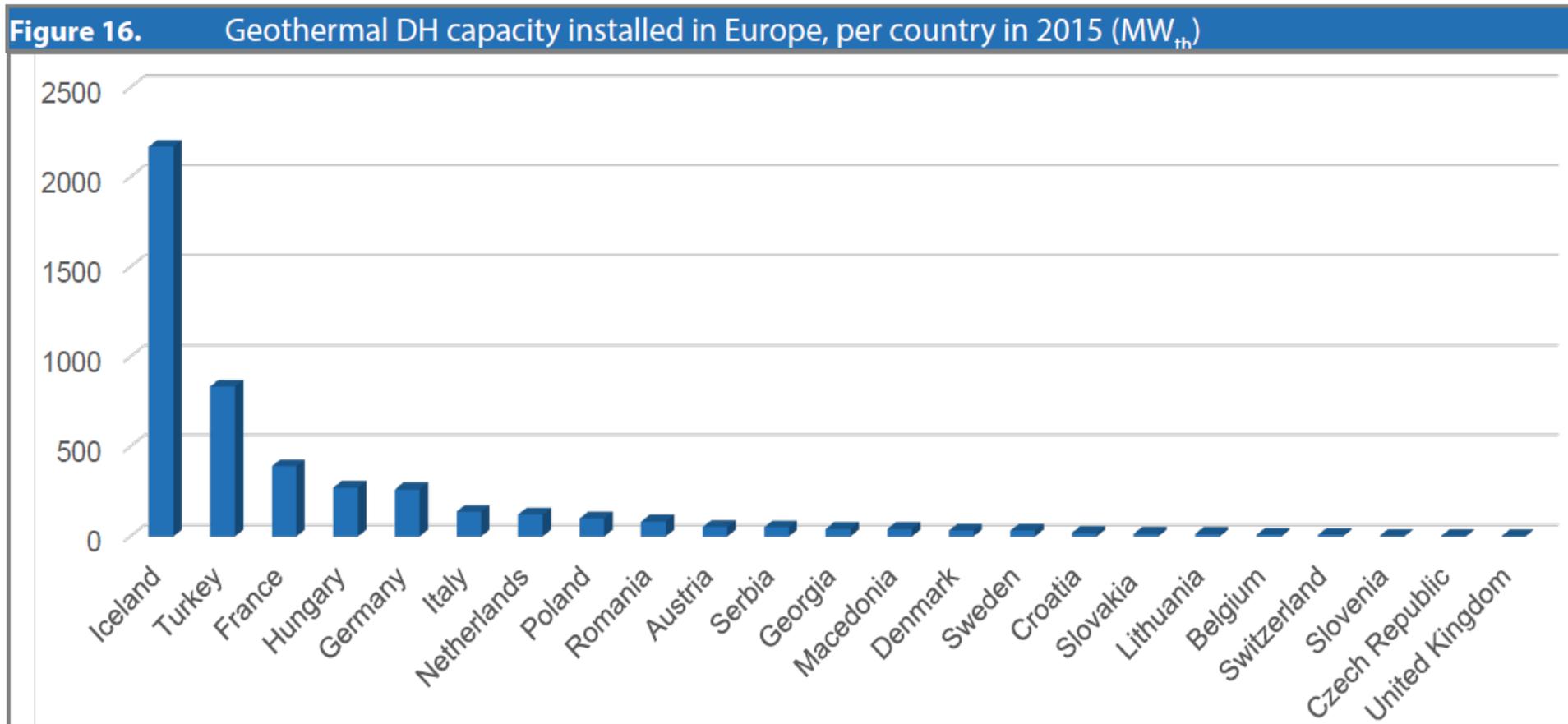
- Lié à l'irradiance solaire
- La ressource correspond +/- à la température moyenne de l'air (autour de 10°C)
- Valorisation via des Pompes à chaleur (PAC)
 - Coefficient de Performance (COP) =
Chaleur fournie/ Electricité consommée
- En Suisse, sondes géothermiques verticales et nappes de tubes horizontales = 2'720 GWh/an (≈80% de l'ensemble de la valorisation géothermique en CH)
- En UE, environ 20'000 GWh, avec 1.34 millions de PAC_{Géo}



Source: L'utilisation de la chaleur terrestre,
OFEN (www.geothermie.ch)

Moyenne enthalpie : réseaux géothermiques en Europe

Puissance / énergie des réseaux géothermiques



EUROPE «élargie»

4'702 MW_{th}

13 TWh

≈ 250 réseaux avec géothermie

dont UE28

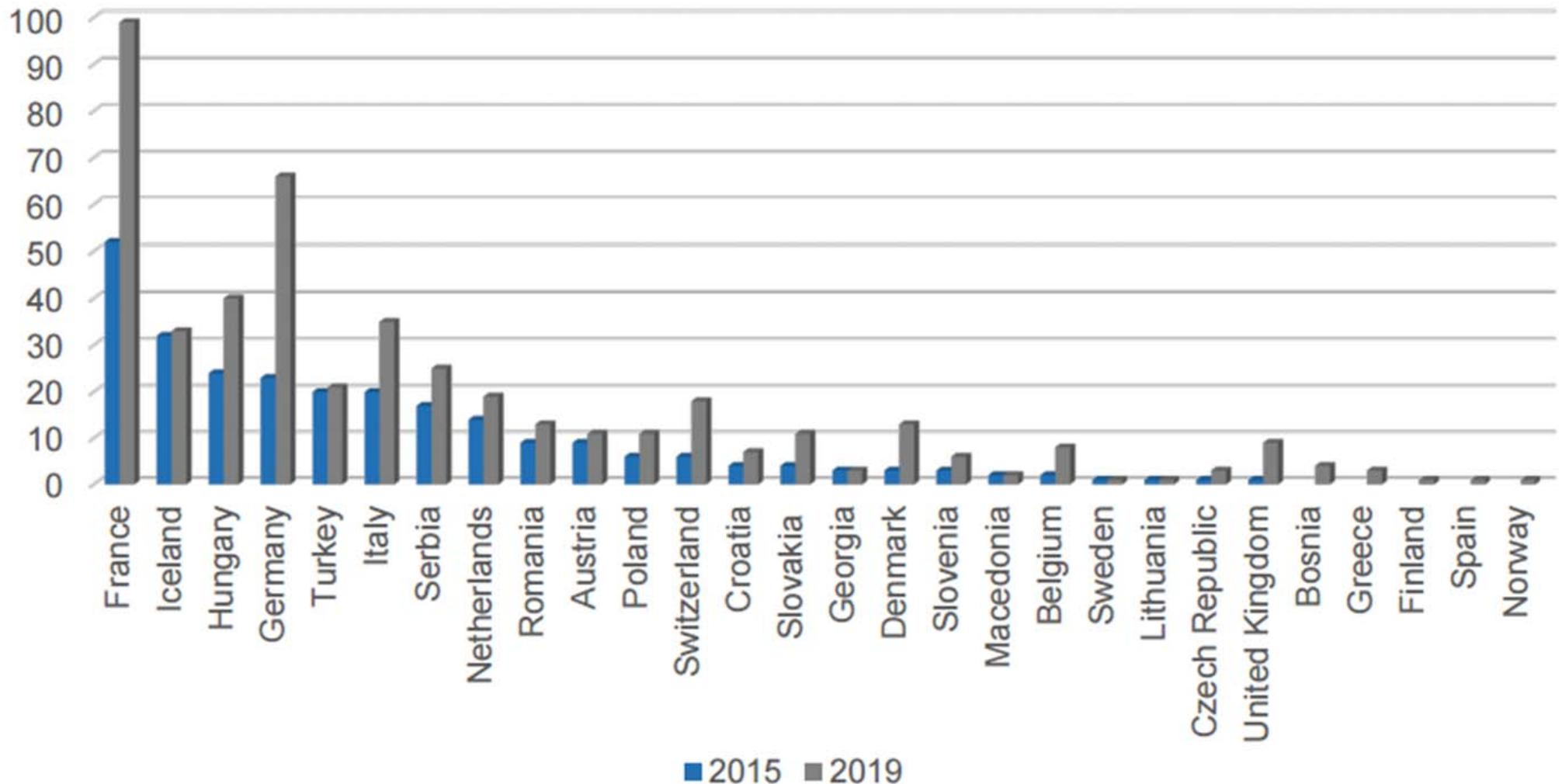
1'552 MW_{th}

4.3 TWh

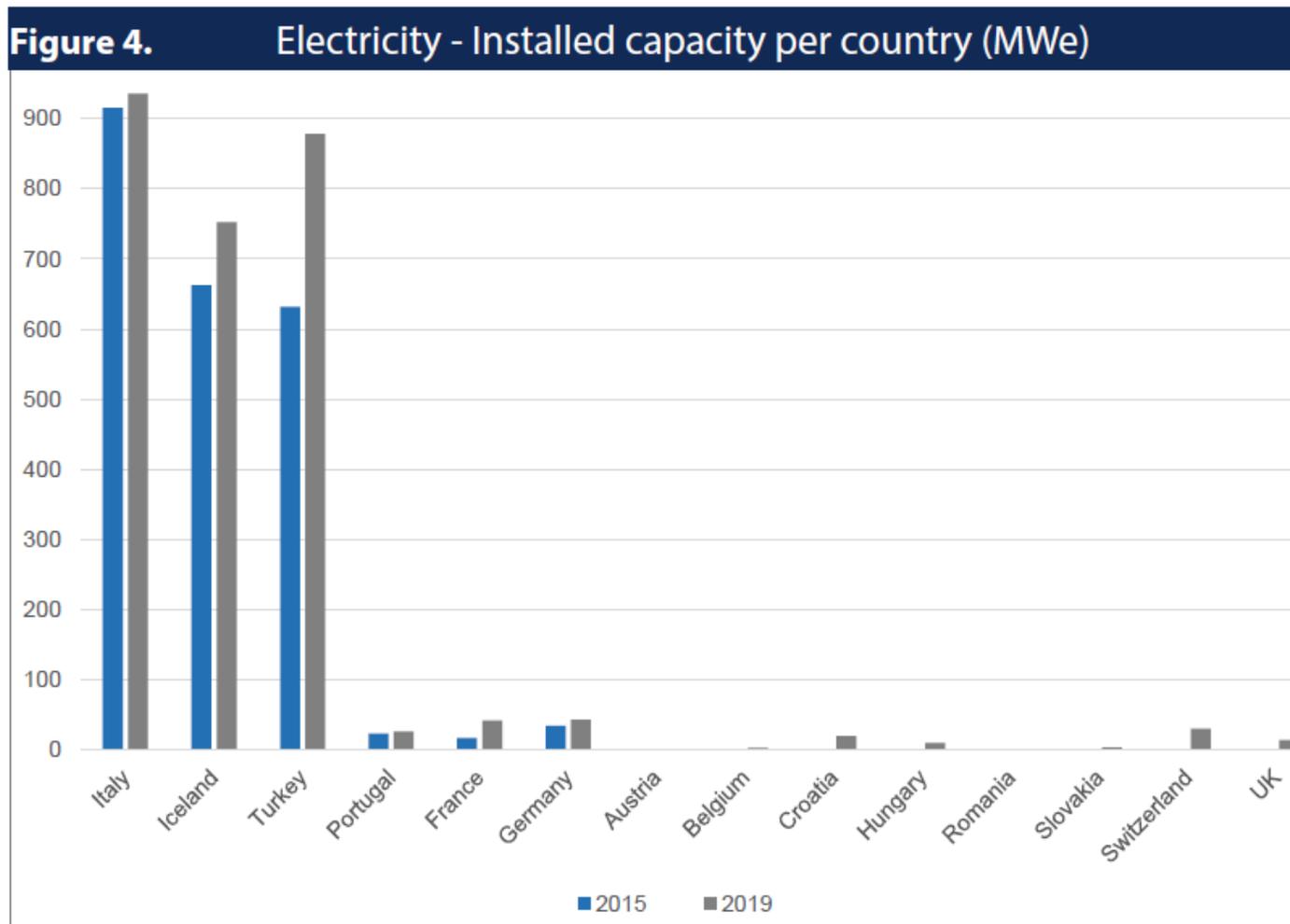
≈ 170 réseaux avec géothermie

Nb réseaux géothermiques en Europe

Nombre de réseaux «principalement» géothermiques



Haute enthalpie : électricité



EUROPE «élargie»

2'285 MW_{él}

12 TWh

88 installations

dont UE28

991 MW_{él}

6.2 TWh

52 installations (Lardarello, IT)

1. Centrale directe*

- Si vapeur surchauffée (i.e. Larderello, Italie)
- Avec $T = 204^\circ$ et vapeur à 111 kg/s et 5.5 bars : $57 \text{ MW}_{\text{el}}$ et $\eta_{\text{nom}} = 21\%$

2. Centrale à vaporisation par flash*

- Mélange liquide-vapeur
- Avec $T = 230^\circ$ et eau à 760 kg/s et 28 bars : $57 \text{ MW}_{\text{el}}$ et $\eta_{\text{nom}} = 10\%$
- Double flash : $77 \text{ MW}_{\text{el}}$ et $\eta_{\text{nom}} = 13\%$

*Rendement nominal calculé avec Temp injection = 50°

3. Centrale à cycle binaire*

- Utilisation d'un deuxième fluide (organique) en cycle fermé (ORC)
- Avec $T = 169^\circ$ et eau à 310 kg/s et 20 bars : 19 MW_{el} et $\eta_{nom} = 12\%$
- Avec cycle de Kalina (eau-ammoniac) : 22 MW_{el} et $\eta_{nom} = 14\%$

4. Cycle combiné ou mixte possible (1 ou 2 + 3)

* Rendement nominal calculé avec Temp injection = 50°

Valorisation électrique réelle

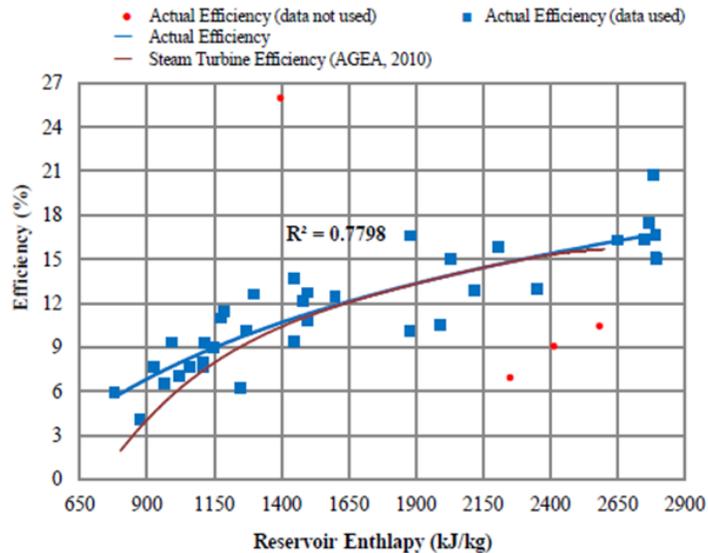


Figure 7: The single flash and dry steam efficiency.

*L'enthalpie du réservoir dépend du fluide géothermique (mélange eau-vapeur, Température, pression)
→ notion de potentiel brut ou « pouvoir calorifique »*

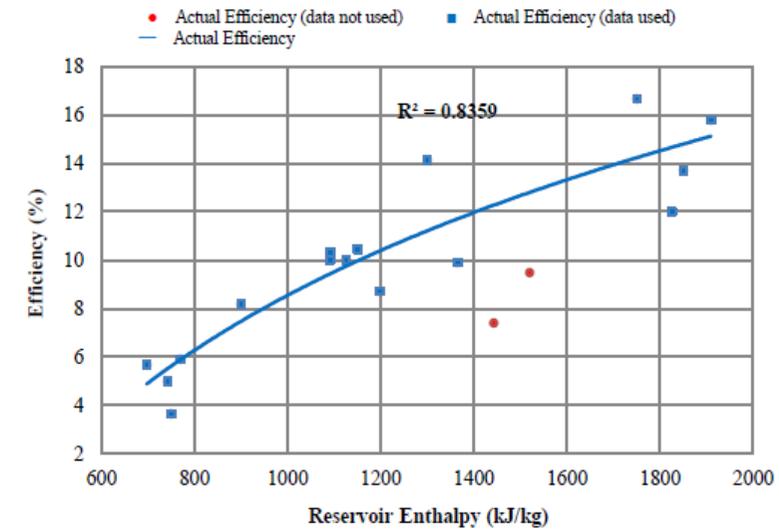


Figure 8: The double flash actual efficiency

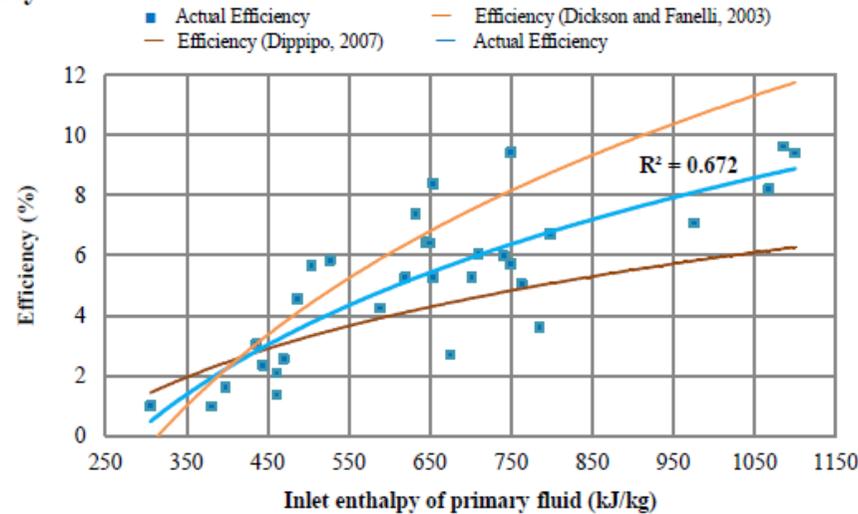
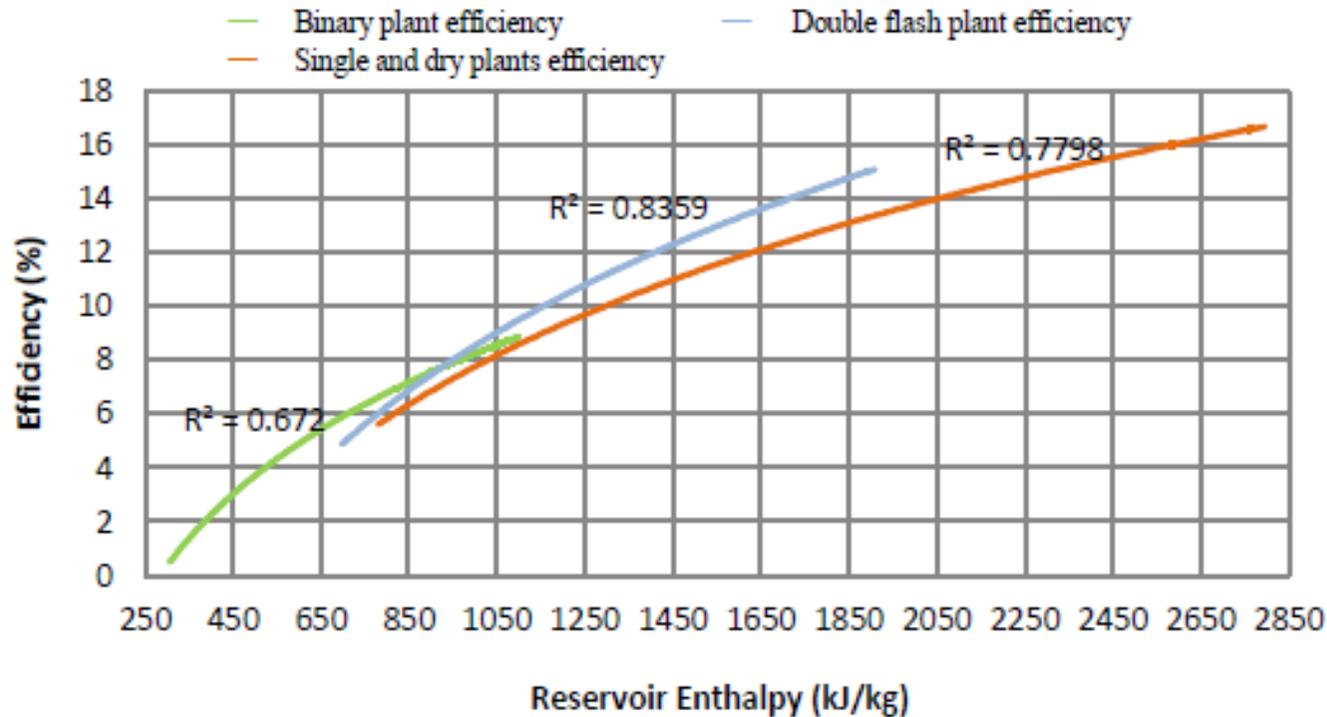


Figure 12: The binary efficiency based on enthalpy.

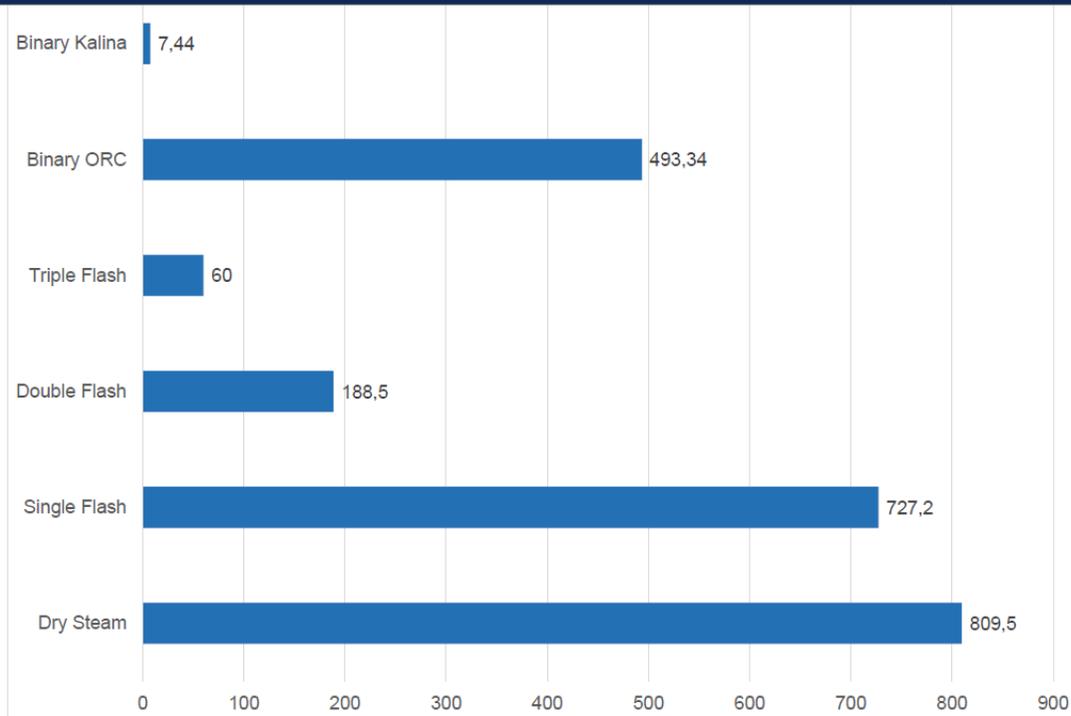
Valorisation électrique réelle (II)



- 94 installations :
 - Moyenne de 12%
 - Maximum de 21% (Indonésie)
 - Minimum de 1% (ressource à 73°C)

Type de turbines installées (Europe)

Figure 10. Turbines - Installed capacity (MWe) per technology



Au total, 20% des turbines installées sont binaires, mais 80% des nouvelles turbines installées en 2013/2014 sont binaires

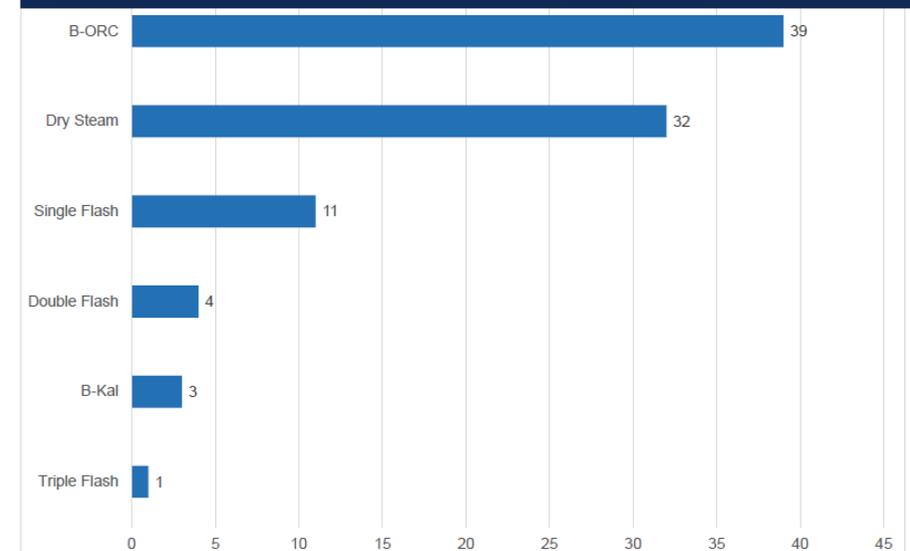
Capacité installée (en MW_{el} et %) par technologie en Europe (yc Islande et Turquie), source : EGEC, MARKET REPORT 2015

• Coûts approximatifs

- Conventionnel (dry and flash)
 - coûts complets ≈ 7 ct/kWh
- Cycle binaire (ORC et Kalina)
 - coûts complets $\approx 12-30$ ct/kWh
 - nouveaux marchés pour $T_{\text{ressource}} < 180^{\circ}\text{C}$

source : EGEC, MARKET REPORT 2013/2014

Figure 12. Turbines - Number of turbines per technology



Valorisation thermique

- Si $T < 100^\circ$, valorisation directe via CAD plus intéressante
- Utilisation de pompes à chaleur pour modifier la température possible (e.g. Riehen)
- En général, $1 \text{ kWh}_{\text{él}} \approx 5-10 \text{ kWh}_{\text{th}}$
- Couplage avec électrique possible mais plus complexe (utilisation en parallèle ou en cascade)

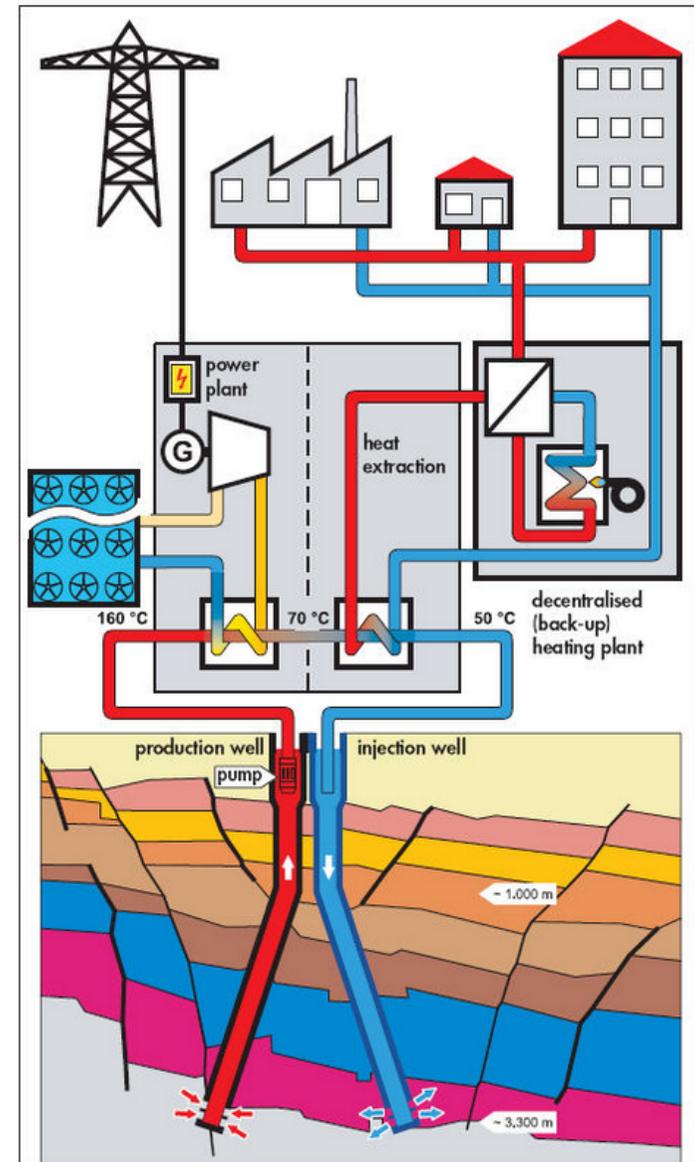


Fig. 6: Diagram of the Landau plant
© geox GmbH

- $E = m * C * \Delta T$
- Le delta Température (ΔT) dépend de la température aller de la ressource ET de la température de réinjection
- Définition OFEN (RPC*) :
 - *«Energie à la tête de forage: masse du fluide caloporteur sortant à la tête de forage multipliée par la différence entre la température de sortie et la température de retour du fluide et par sa capacité thermique spécifique»*
 - $T_{\text{réinjection}}$ non définie $\rightarrow P_{\text{nominale}}$ non définie
- Selon les sources et les objectifs, $T_{\text{réinjection}}$ est différente :
 - En valorisation électrique, souvent 50°C ou 60°C
 - En thermique, peut descendre à 25°C, voir 10°C (utilisation de PAC)

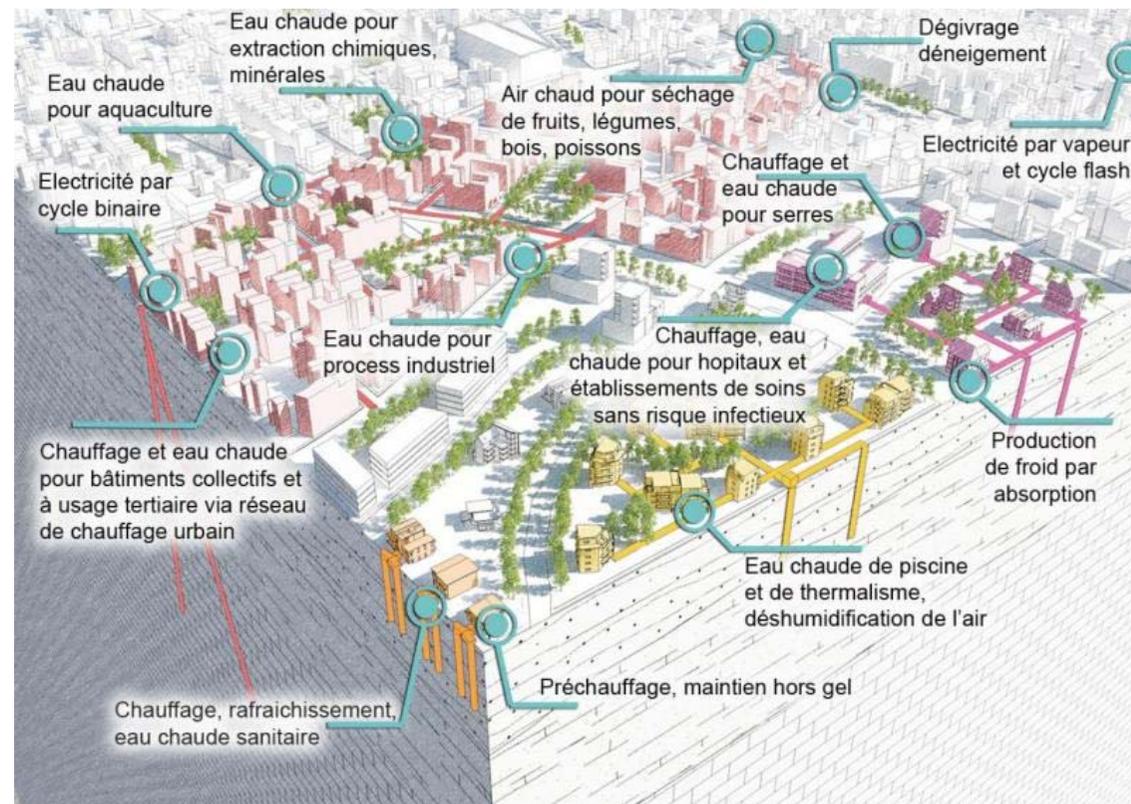
* Source : Directive sur la rétribution à prix coûtant du courant injecté (RPC) Art. 7a Len Géothermie - Appendice 1.4 OEne

Points-clés statistiques Géothermiques

- Ressource globalement abondante mais
 - Valorisation électrique actuellement essentiellement dans des sites spécifiques
 - Valorisation thermique se développe plus vite
 - La géothermie reste quantitativement faible (<1%) dans le système énergétique mondial

- **Multi-valorisation**

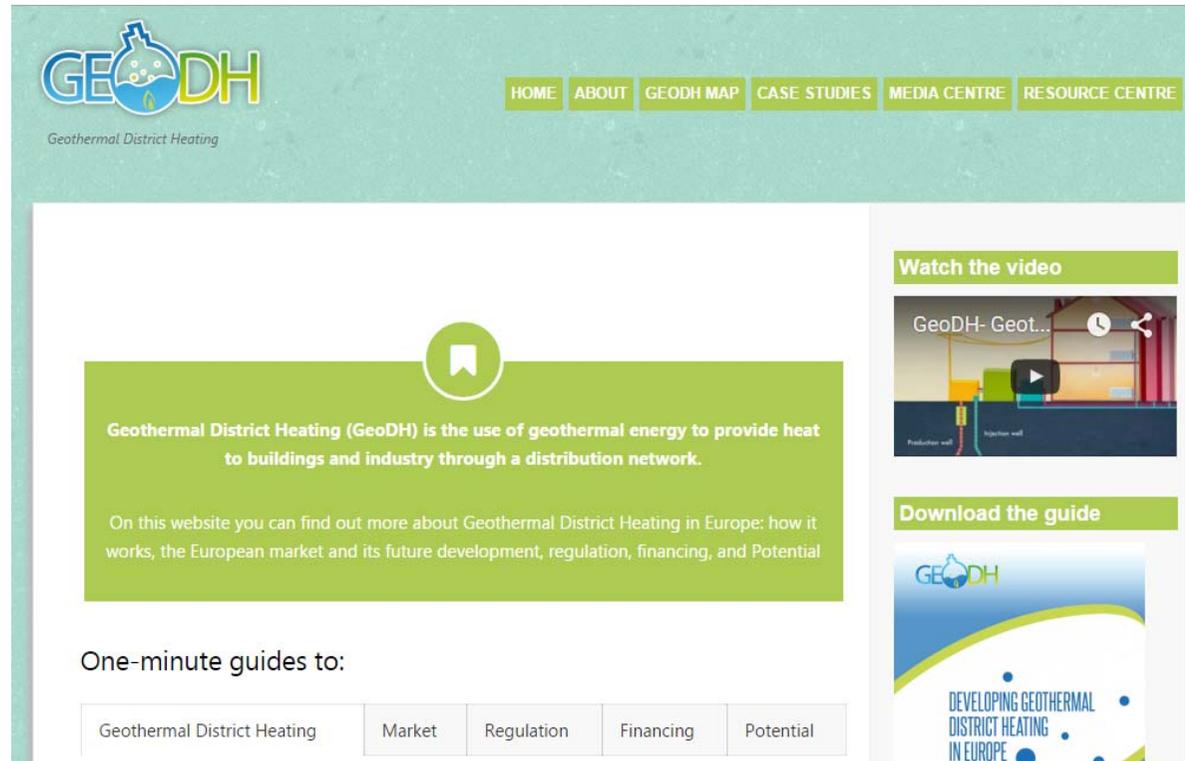
- Faible rendement électrique : difficulté de concurrencer le solaire, l'éolien ou l'hydraulique
- Grande quantité de chaleur valorisable dans de multiples usages → la ville géothermale



Source ADEME/BRGM

Projet européen GeoDH

- Projet réalisé entre 2012 et 2014 sur les **réseaux thermiques avec géothermie** (<http://geodh.eu/>)
- Principaux résultats :
 - Technologie / Marché / Régulation / Financement / Potentiel
 - 27 résumé d'études de cas
- Résultats explicités ici :
 - Carte GIS GeoDH
 - Pré-requis pour le développement GeoDH
 - Assurance risque
 - Points clés financement GeoDH



The screenshot shows the homepage of the GeoDH website. At the top left is the logo for GeoDH (Geothermal District Heating) featuring a stylized globe with a flame. To the right of the logo is a navigation menu with buttons for HOME, ABOUT, GEODH MAP, CASE STUDIES, MEDIA CENTRE, and RESOURCE CENTRE. The main content area has a green header with a bookmark icon and the text: "Geothermal District Heating (GeoDH) is the use of geothermal energy to provide heat to buildings and industry through a distribution network." Below this, it says: "On this website you can find out more about Geothermal District Heating in Europe: how it works, the European market and its future development, regulation, financing, and Potential". Underneath, there is a section titled "One-minute guides to:" followed by a row of buttons for "Geothermal District Heating", "Market", "Regulation", "Financing", and "Potential". On the right side, there are two promotional boxes: "Watch the video" with a video player thumbnail showing a geothermal well and a "Producer well" label, and "Download the guide" with a thumbnail for a guide titled "DEVELOPING GEOTHERMAL DISTRICT HEATING IN EUROPE".

Carte GIS européenne

- Carte GIS : http://map.mfgi.hu/geo_DH/



Pré-requis favorable aux GeoDH

- Données géologiques librement disponible (e.g. après 5 ans aux Pays-Bas)
- Assurance risque publique/privée (e.g. en France, Pays-Bas)
- Définition claire des procédures pour les licences (e.g. Danemark, France, Pologne)
- Stratégie nationale et régionale complémentaires (e.g. Bulgarie, Hongrie, Italie)



14 Reports on Evaluation of Market Barriers for Geothermal District Heating in Europe

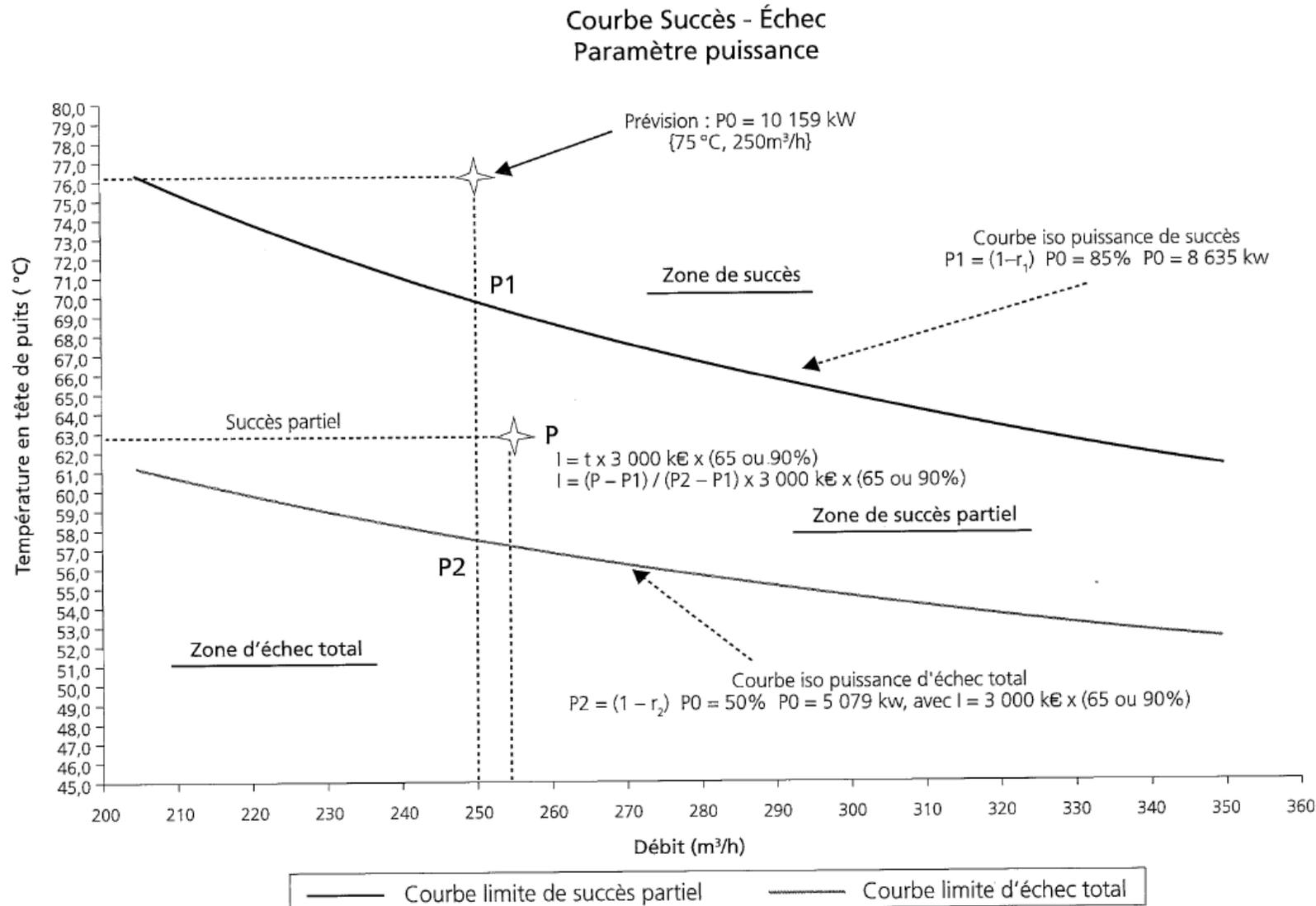
State of play, implementation of the RES Directive, and Recommendations

- Deux types d'assurance :
 - risque géologique (court terme - forage)
 - dépend de la ressource géothermique (température et débits)
 - risque d'exploitation (long terme – typiquement 20 ans)
 - D'une part sur la pérennité de la ressource et les risques de tarissement total ou partiel, et
 - D'autre part sur les dommages sur les installations

- Exemple : SAF Environnement et ADEME en France

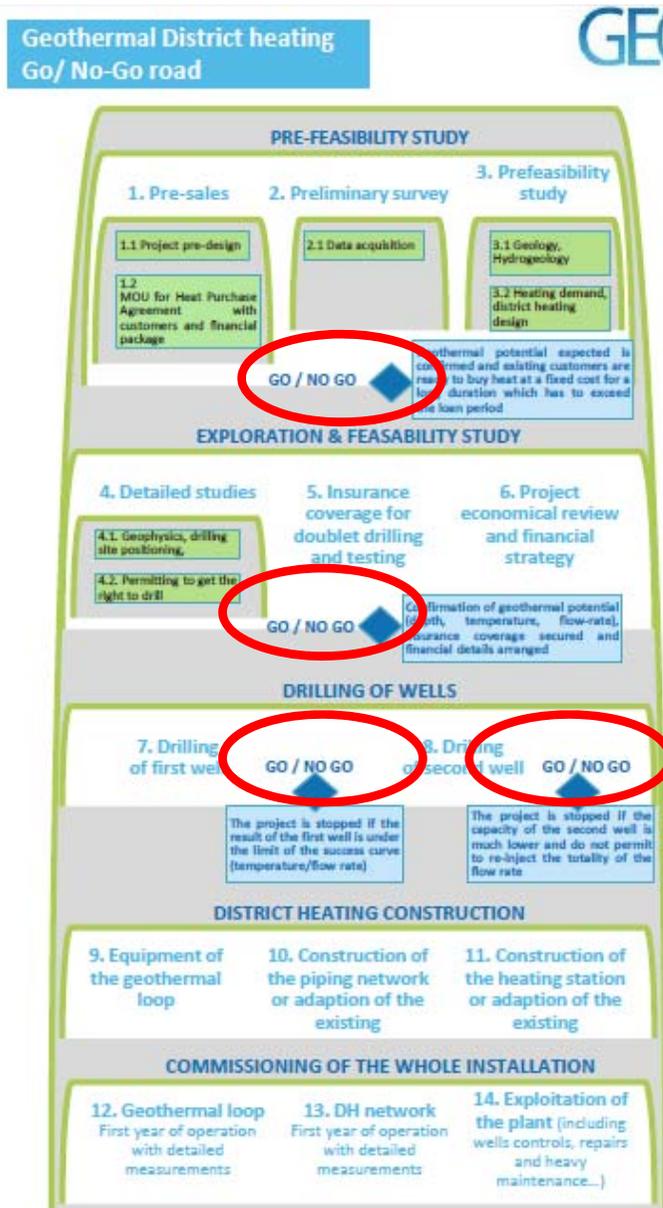
Voir sous http://www.driee.ile-de-france.developpement-durable.gouv.fr/IMG/pdf/CouvRisqGeolGeothermieVF_cle57e144.pdf

Assurance risque géologique : exemple



Points-clés financement

4 principaux GO/NO GO



- Phases 1 à 3 (pré-faisabilité) :
 - Potentiel géothermique
 - Clients chaleur
- Phases 4 à 6 (faisabilité):
 - Confirmation potentiel géothermique
 - Assurances
 - Financements
- Phases 7-8 (forages) :
 - Confirmation débits/température
- Phases 9 à 14 (construction) :
 - Construction/exploitation centrales + CAD

Points-clés financement

Les Paramètres clés du succès



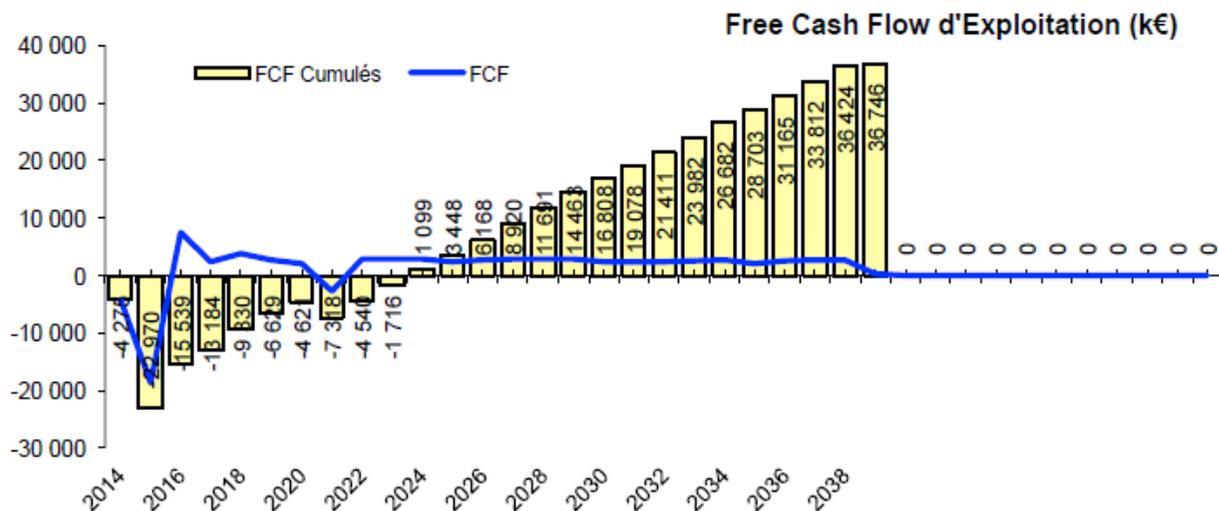
Investissement pour le réseau de chaleur peut être du même ordre de grandeur que l'investissement pour la production géothermique ! («modèle parisien»)



Exemple de financement



- CAPEX de 20 à 30 millions Euros
- «modèle parisien» avec 50/50 entre géothermie et réseau CAD



- Contraintes :
 - Investissements important
 - Risque jugé élevé
 - Temps de réalisation long
 - Retour sur investissement long

➤ Privilégier l'utilisation maximale de la ressource capitalistique (Géothermie)