

Les systèmes ORC

Production d'électricité géothermique à basse température



CAS DEEGEOSYS 2015-16 - CHYN - UniNE

Maxime Freymond - PAC'info Sàrl

Novembre 2016

Notre société



- Pompes à chaleur
- Géothermie
- Formation
- Evènementiel
- Consulting énergétique
- Physique du bâtiment

 **PAC'info Sàrl**
Rue du Four 11
1400 Yverdon-les-Bains

 024 426 02 10
 024 426 02 12
 079 669 75 16

 www.pacinfo.ch
 info@pacinfo.ch

 **GÉOTHERMIE**SCHWEIZ
GÉOTHERMIESUISSE
GEOTERMIASVIZZERA



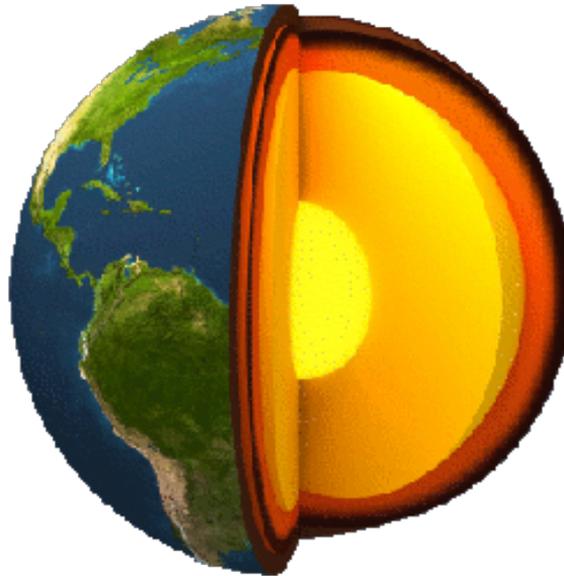
Sommaire

- Introduction à la géothermie
- La géothermie dans le monde et en Suisse
- Qu'est-ce qu'un Organic Rankine Cycle (ORC)
- Pourquoi utiliser un système ORC
- Technologies ORC et Kalina
- Les fluides utilisés et leurs caractéristiques
- Comparaison des technologies
- Les ORC dans le monde
- Feedback d'installations géothermiques utilisant des ORC
- Quelques chiffres clés
- Conclusion

Origine du mot « géothermie »

Géothermie, du grec “gê”, terre et “thermos”, chaud

- Chaleur de la Terre – énergie (!)
- Exploitation de la chaleur de la Terre



Origine de la chaleur

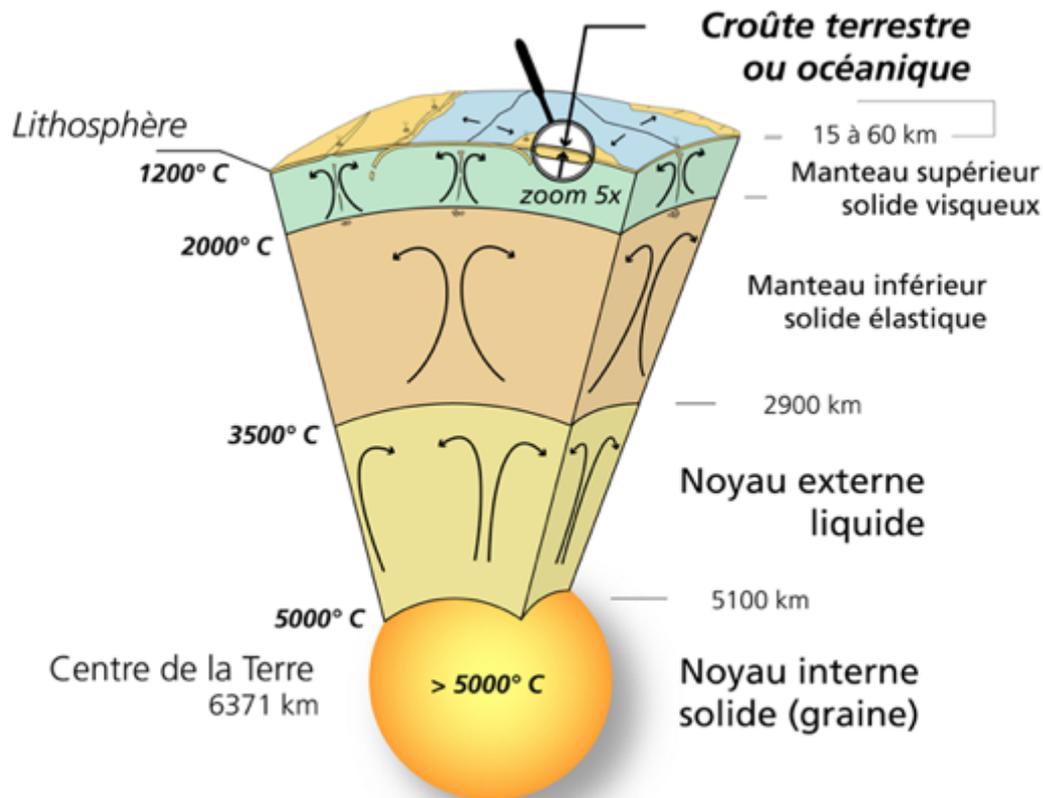
2 origines:

- Stades initiaux de la formation de la Terre : accrétion, cristallisation du magma
- Croûte terrestre : désintégration radioactive naturelle d'éléments contenus dans les roches >> **90% de l'énergie thermique**

99% de la masse de la Terre est à plus de 1000° C !

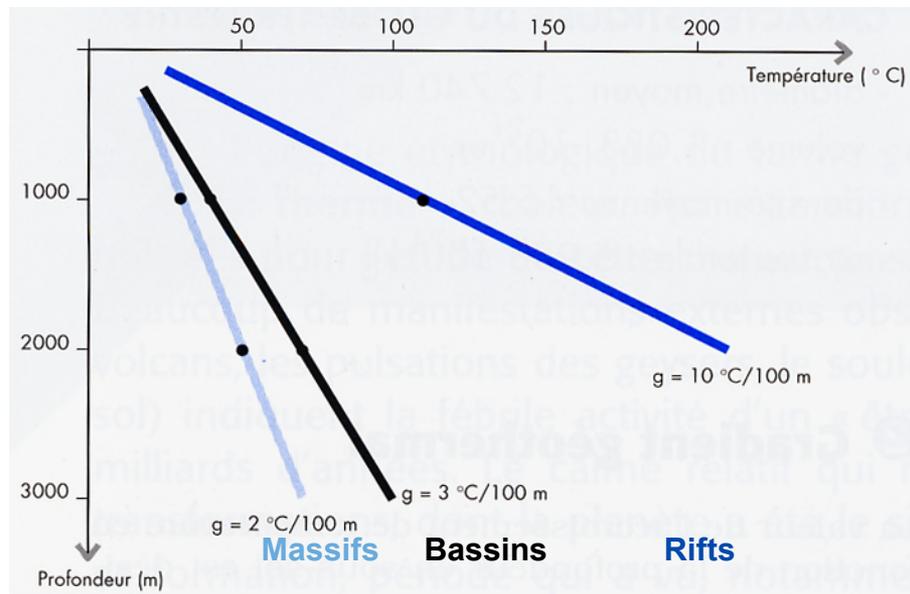
99.9% est à plus de 100° C !

T à la base de la croûte terrestre $\approx 700^{\circ}$ C



Gradient géothermique

- **grad (T) = $\Delta T / \Delta z$** = gradient de température ($K m^{-1}$)
- L'accroissement de la température en fonction de la profondeur est appelé gradient géothermique
- Valeur moyenne: 30 - 35 °C / km



Le gradient de température géothermique

Manifestation de la chaleur en surface

Volcan



Geyser



Fumerole



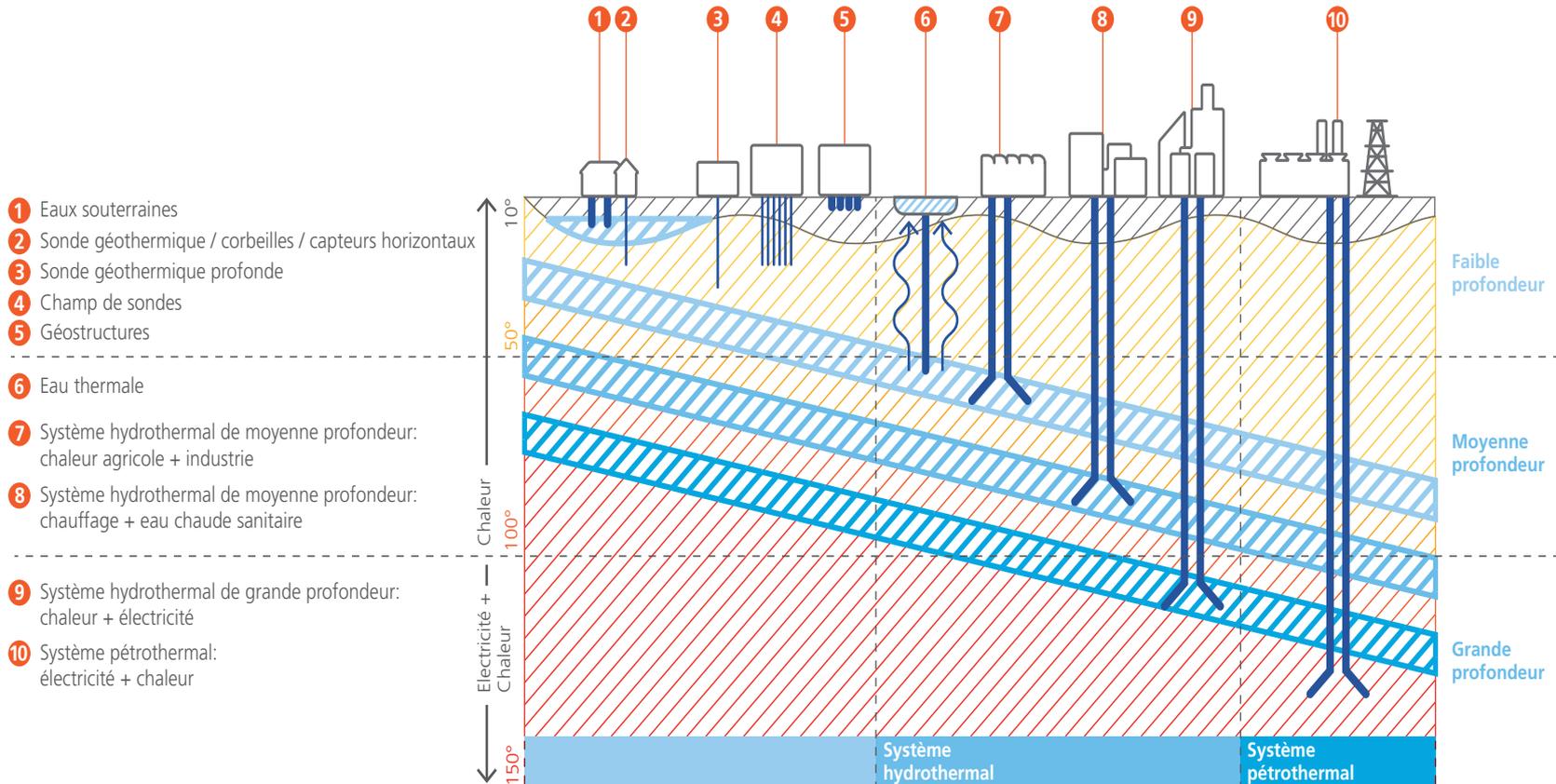
Source thermale
(en Suisse, env. 15
systèmes >20°C)



Pas de
manifestation
visible



Les différents types de géothermie



Les différents types de géothermie

La géothermie dans le monde

- Production mondiale d'électricité géothermique :
 - 11.3 GW
 - 69 TWh
- Les principaux producteurs d'électricité géothermique:
 - USA – 17 TWh
 - Philippines – 10.3 TWh
 - Indonésie – 9.6 TWh
 - Mexique – 7 TWh
- Les principaux producteurs d'électricité géothermique avec des ORC:
 - USA - Turquie - Nouvelle Zélande – Philippines
 - En Europe : Portugal – Allemagne

Projets de géothermie profonde en Suisse

La géothermie en Suisse

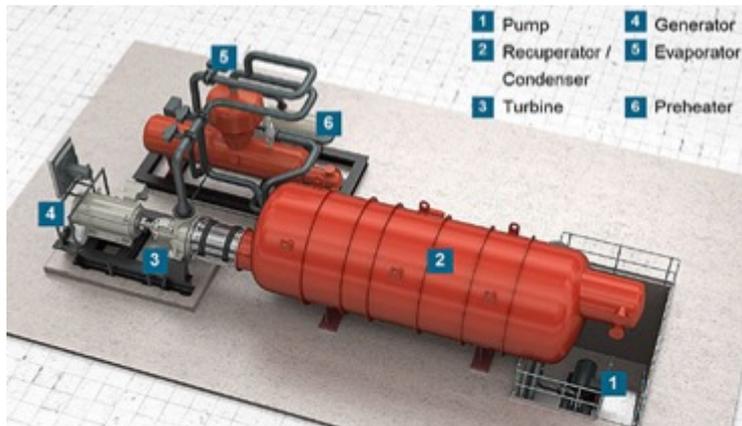
- Partie intégrante de la politique énergétique 2050 de la Confédération
- L'OFEN a pour cible une production d'électricité de 4 TWh d'ici à 2050 (6% conso. CH)
 - Couverture de risque (60% du prix de forage) valable pour la production d'électricité
 - La rétribution à prix coutant (RPC) de l'électricité géothermique relance des projets
 - D'ici 2019, couverture de risque également pour les projets de CAD (prélevé sur la taxe CO₂)
- Température en Suisse de 90 à 150° C entre 3000 et 4000m de profondeur
- Nécessité de produire de l'électricité à ces températures
- Les systèmes ORC et Kalina sont une solution



Projets de géothermie profonde en Suisse

Qu'est-ce qu'un ORC

- Organic Rankine Cycle
- Production d'électricité avec une source de chaleur entre 90 et 200° C
- Circuit secondaire contenant un fluide avec une température d'évaporation basse
- Pompe de circulation – Evaporateur – Turbine - Générateur électrique – Condenseur
- La source de chaleur peut provenir des :
 - Energies renouvelables: géothermie, biomasse, solaire
 - Energies fossiles: mazout, gaz, charbon
- Refroidissement à l'eau ou à l'air



Composants principaux d'un système ORC

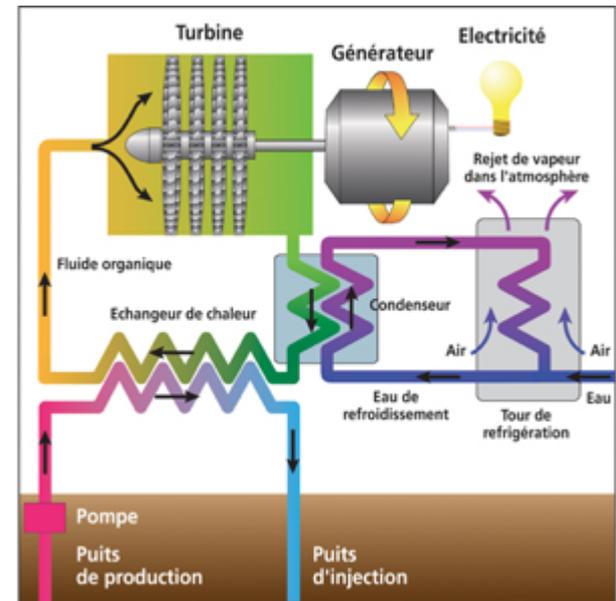


Schéma de fonctionnement d'un ORC géothermique

Pourquoi utiliser un système ORC

- Les systèmes ORC ou Kalina sont utilisés pour la production d'électricité dans plusieurs cas de figure:
 - Température géothermique entre 90 et 200° C
 - Améliorer les performances d'un système standard single ou double-flash jusqu'à 200° C .
 - Refroidir l'eau géothermique avant d'alimenter le chauffage à distance
 - En cas de faible demande de chauffage en été
 - Zones sans besoin de chauffage
 - Zones où le réseau électrique n'est pas disponible
 - Rejets thermiques sont disponibles

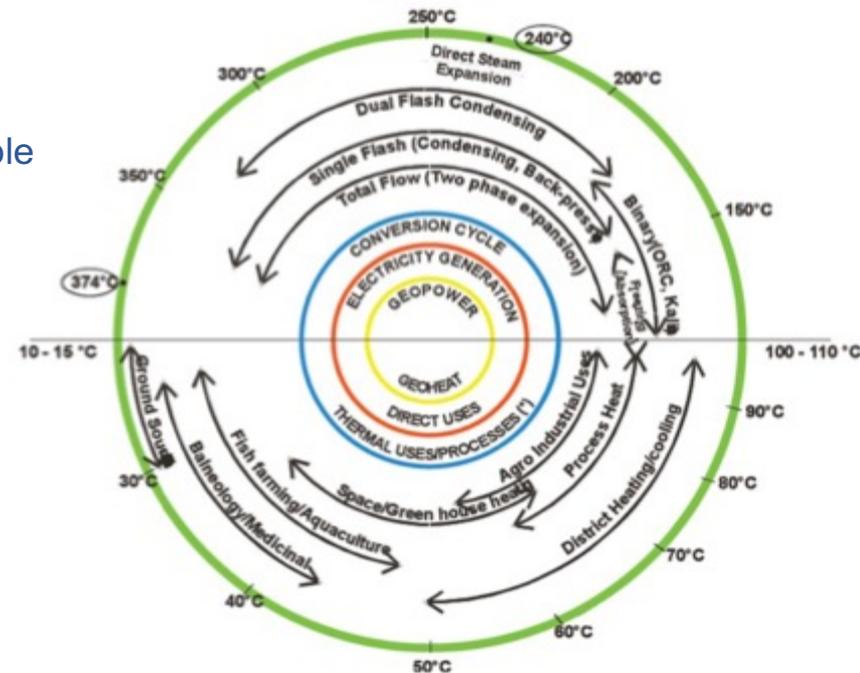


Diagramme d'utilisation de la chaleur géothermique

Technologies ORC

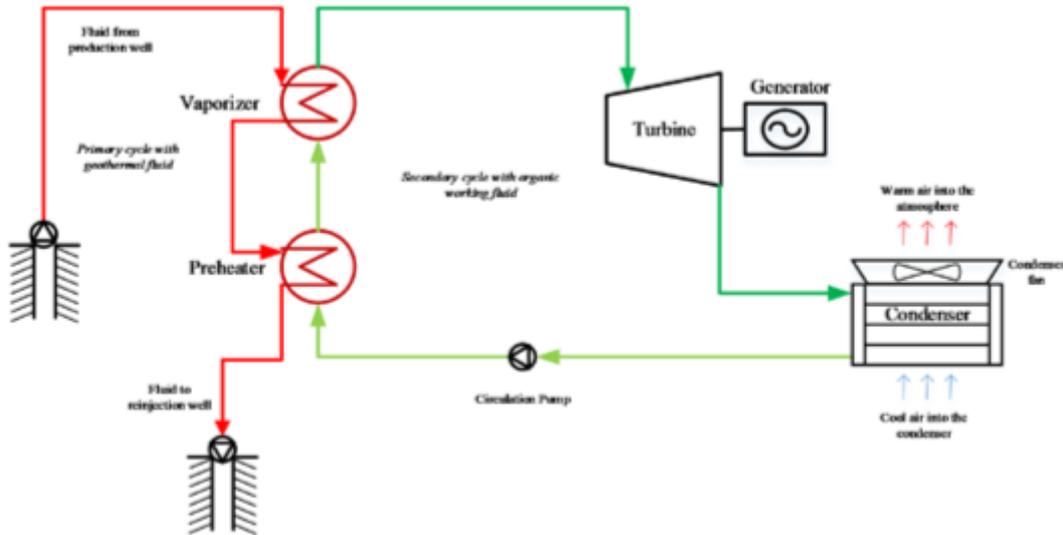


Schéma de principe d'un cycle ORC

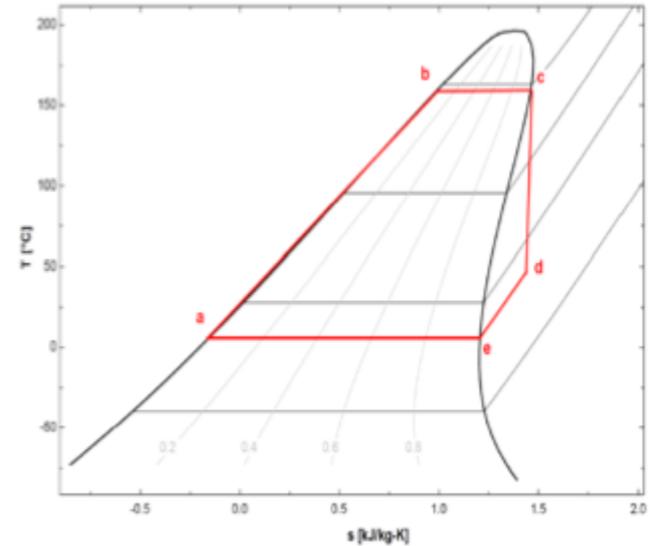


Diagramme T-S d'un cycle ORC

• Types d'ORC:

- Transcritique à un niveau de pression
- Transcritique à deux niveaux de pression
- Supercritique

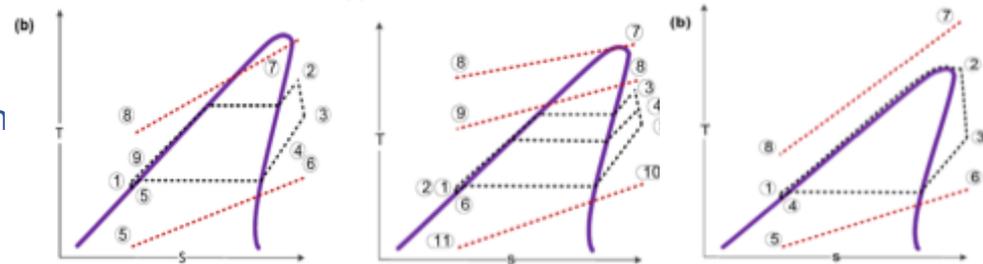


Diagramme T-S des trois types de cycle ORC

Les fluides et leurs caractéristiques (1/2)

- Le fluide organique utilisé a un impact majeur sur:
 - L'équipement de l'ORC
 - Conditions de fonctionnement
 - Impact environnemental du système
 - L'efficacité du système
- Dans le passé:
 - R11, R12, R113 et R114 (GWP - ODP - ALT)
- Aujourd'hui, on privilégie des fluides plus « Environmentally Friendly » tels que:
 - R123, R245fa, R134a, Pentane, Toluène, Heptane
- Et même naturels (Kalina)
 - eau, ammoniac, mélange eau-ammoniac
- Comment choisir le fluide:
 - Température maximale d'opération, d'évaporation et de condensation
 - Pression en fonction de la température
 - Prix du fluide

Les fluides et leurs caractéristiques (2/2)

3 catégories de fluides

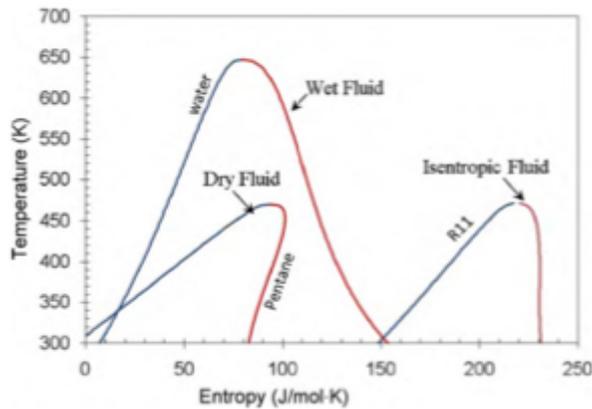


Diagramme T-S des 3 catégories de fluides organiques

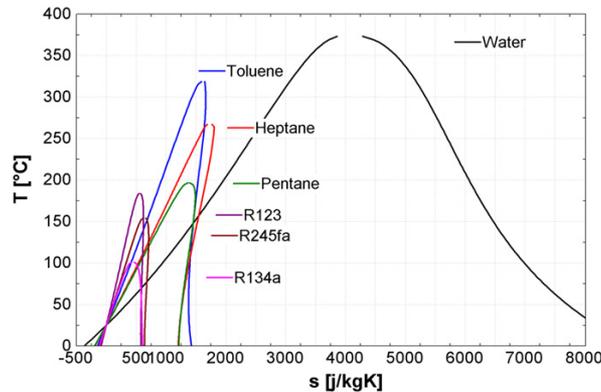


Diagramme T-S de l'eau et de fluides organiques

Erosion des pales de la turbine

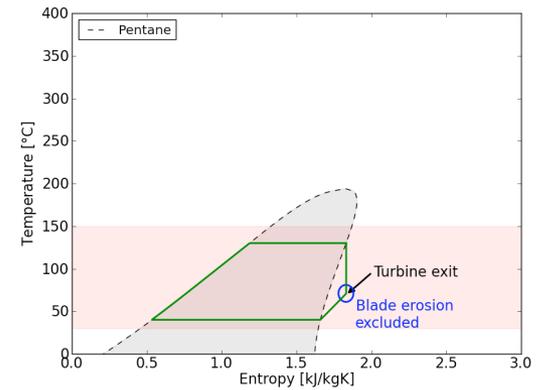


Diagramme T-S du penthane, pas d'érosion de la turbine

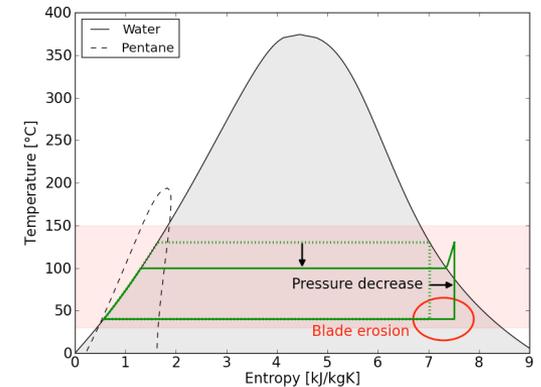


Diagramme T-S de l'eau, érosion de la turbine

Technologies Kalina

- Types de cycle de Kalina:
 - 1^{ère} génération
 - 2^{ème} génération

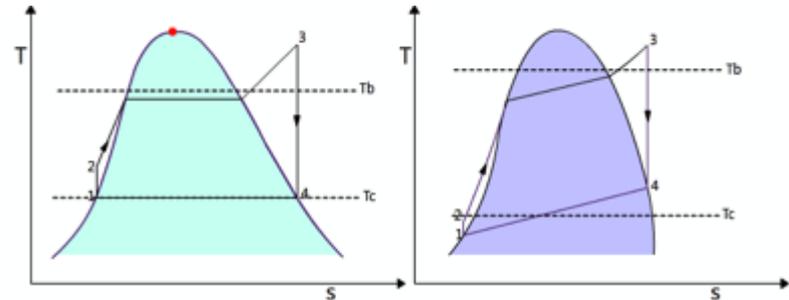


Diagramme T-S d'un ORC et d'un cycle de Kalina

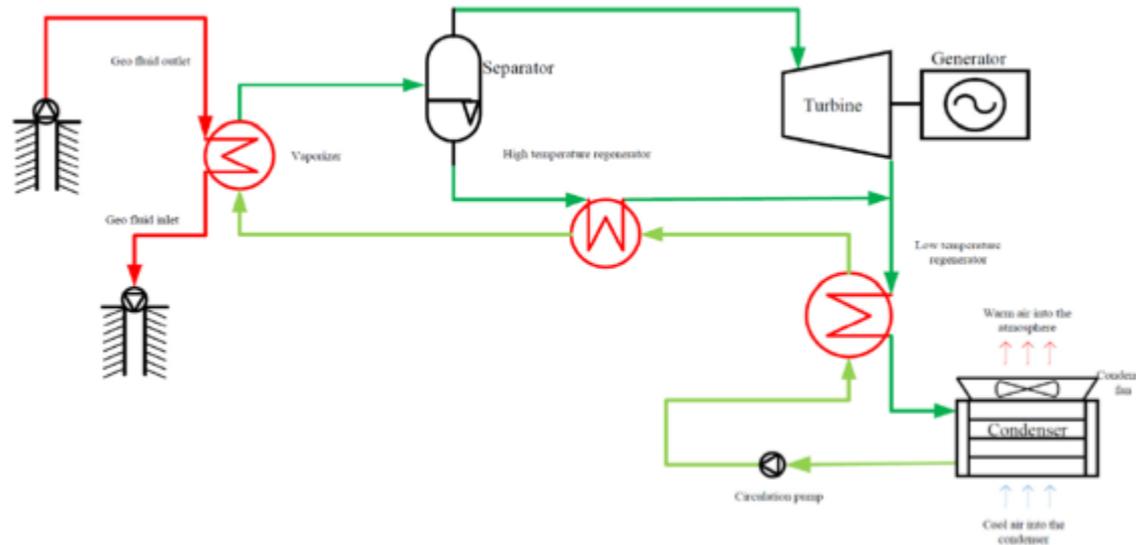
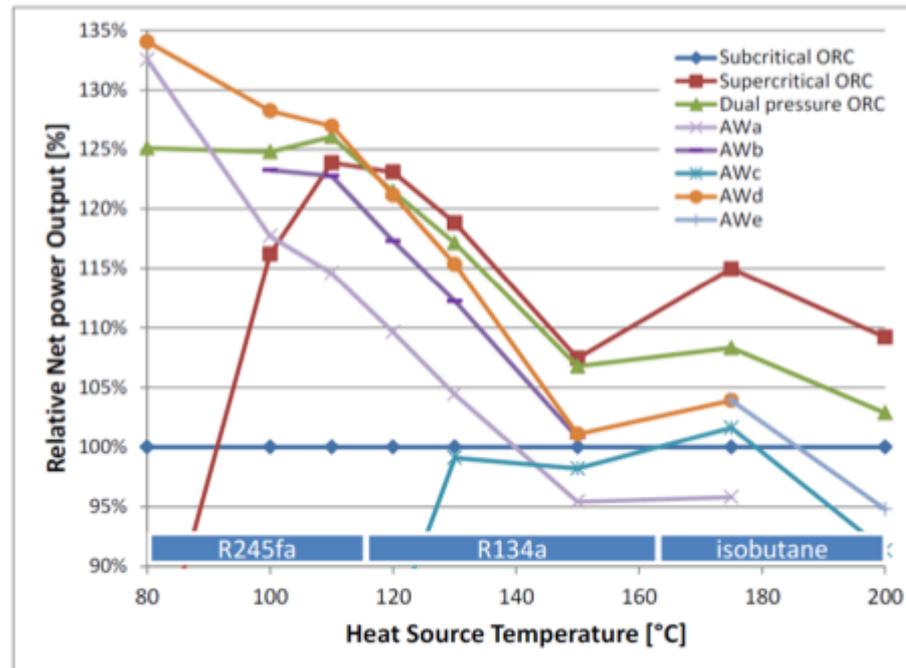


Schéma de principe d'un cycle de Kalina

Comparaison des systèmes (1/2)

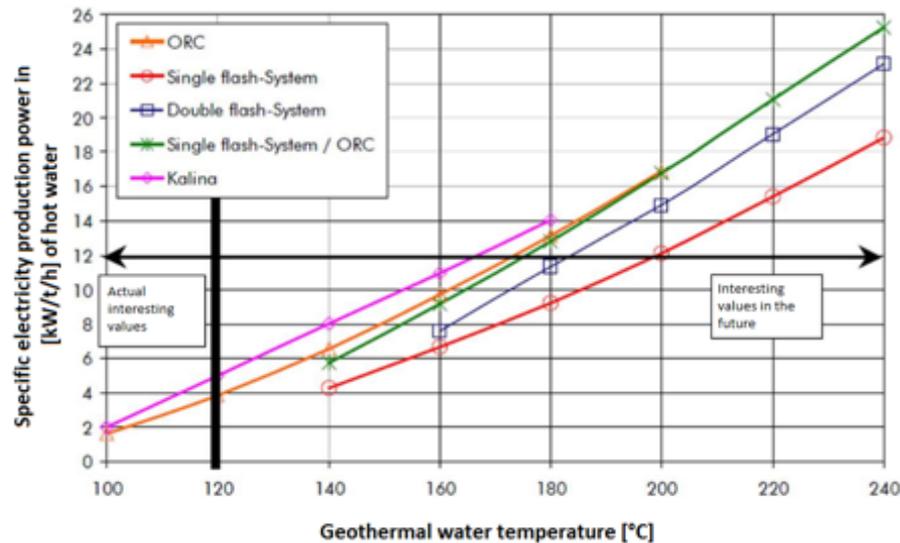
- Cycles de Kalina 2^{ème} génération pour les températures jusqu'à 120° C
- Cycles ORC supercritique pour les températures entre 120 et 200° C



Puissance fournie en fonction de la température de la source pour différent cycles

Comparaison des systèmes (2/2)

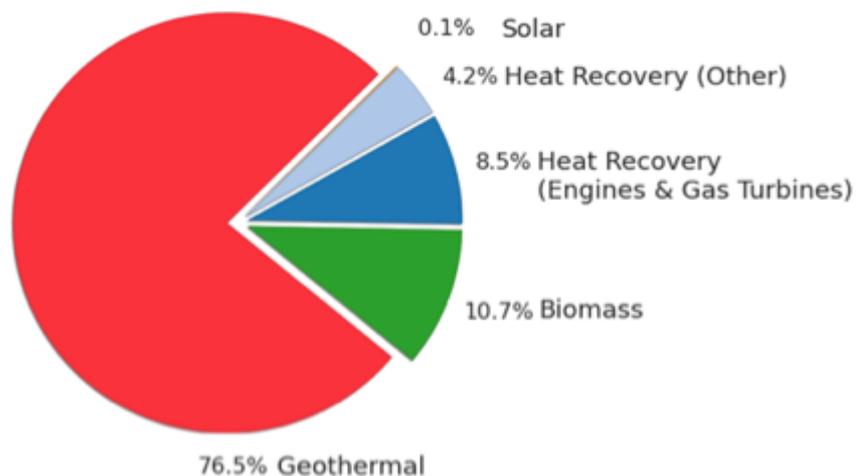
- Cycle de Rankine
- Cycle de Kalina
- Système single-flasch
- Système double-flasch
- ORC combiné à un système single-flasch



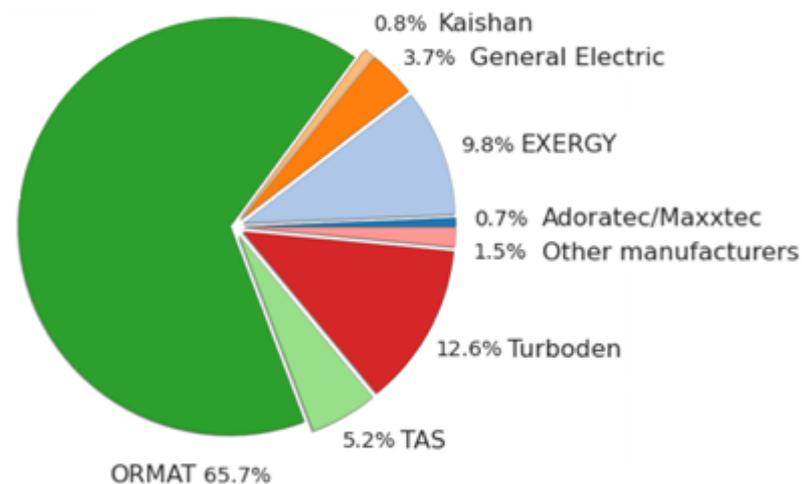
Puissance fournie en fonction de la température de la source géothermique

Les ORC dans le monde

- Les principaux producteurs d'électricité géothermique avec des ORC:
 - USA - Turquie - Nouvelle Zélande – Philippines
 - En Europe : Portugal – Allemagne



Répartition de la capacité des ORC dans le monde



Répartition du marché selon la capacité des ORC dans le monde

Exemples d'installations (1/5)

- Unterhaching – Allemagne
 - Doublet de 3500 m de profondeur à 122° C
 - Puissance électrique de 3.4 MW_e ($\eta=10-13\%$)
 - 85% pour l'électricité – 6000 ménages
 - Couplage en parallèle
 - Puissance du CAD de 80 MW_{th}
 - 15% pour le CAD - 3000 ménages

- Landau – Allemagne
 - Doublet de 3300 m de profondeur à 155° C
 - Puissance électrique de 3.0 MW_e ($\eta=10\%$)
 - 100% pour l'électricité – 6000 ménages
 - Couplage en série
 - Puissance du CAD de 5.1 MW_{th} (T=80° C)
 - CAD - 1000 ménages



Exemples d'installations (2/5)

- Neustadt-Glewe – Allemagne
 - Doublet de 2250 m de profondeur à 98° C
 - Puissance électrique de 210 kW_e ($\eta=7\%$)
 - Electricité en été et chauffage en hiver
 - Puissance du CAD de 11 MW_{th} (4MW_{th} géothermie)
 - CAD - 1300 ménages, 20 commerces, 1 industrie



- Bad-Blumau – Autriche
 - Doublet de 2360 m (P) et 3050 m (I) de profondeur à 110° C
 - Chauffage du complexe et des bains avec une puissance de 3.5 MW_{th} (T=85° C)
 - Surplus de chaleur utilisé pour l'électricité à 250 kW_e
 - Alimentant le complexe et réinjection dans le réseau
 - Forage de 1200 m (P) de profondeur à 47° C
 - Chauffage des bains uniquement



Exemples d'installations (3/5)

- Altheim – Autriche

- Doublet de 2300 m de profondeur à 106° C
- Puissance électrique de 1 MW_e
- Electricité en été et chauffage en hiver
- Puissance du CAD de 12 MW_{th}
- CAD - 650 ménages, piscine publique, école



- Husavik – Islande

- 5 forages de 400 à 1000 m de profondeur à 124° C
- Puissance électrique de 1.7 MW_e ($\eta=12\%$)
- 75% de l'électricité de village
- Couplage en parallèle
- Puissance du CAD de 13 MW_{th} pour la ville
- Puissance de 23MW_{th} pour industries, serres, rampe chauffante, aquaculture.
- Puissance de 18MW_{th} au condenseur pour chauffer l'eau de 5 à 23° C pour l'aquaculture et bains thermaux.



Exemples d'installations (4/5)

- Chena Hot Springs – Alaska
 - 20 forages à 300 m de profondeur à 74° C
 - Puissance électrique de 2 x 200 kW_e ($\eta=8.2\%$)
 - Electricité pour le complexe pas raccordé au réseau
 - Couplage en série
 - Chaleur utilisé pour les bâtiments, les bains et spas
 - La chaleur alimente une machine de froid à adsorption pour le musée de glace, et assure le chauffage des serres (communauté auto-suffisante)
 - Refroidissement à eau (4° C) l'été et air en hiver



Exemples d'installations (5/5)

Name of the project	Country	Production type	ORC type	Electricity installation date	Production well [m]	Injection well [m]	Water flow [l/s]	Production well temp. [°C]	Injection well temp. [°C]	District heating temp. [°C]	District heating power [MW]	District heating production [MWh/y]	Electricity power [MW]	Electricity production [MWh/y]	Condenser cooling mean & Temp [°C]	ORC efficiency [%]	Annual CO ₂ savings [t/y]	Investment costs [M€]	Electricity price [€/kWh]	Heat price [€/kWh]	Damping time
Unterhaching	Germany	E+H	Kalina - Siemens	2009	3446	3864	150	122	-	-	38	47'000	3.36	21'500	Air	13	35'000	77	0.23	0.06	15
Landau	Germany	E+H	ORC Isopentthane	2007	3300	3300	80	155	-	-	5.1	9'200	3.00	22'000	Air	10	6'000	20	0.15	-	-
Neustadt-Glewe	Germany	E+H	ORC n-perfluor-pentthane	1995	2250	2250	33	98	50	84	4.5	22'200	0.21	1200	Air	6.5	2700	9.5	0.20	-	-
Bad Blumau	Austria	E+H	ORC - ORMAT Pentthane	2001	2360 1200	3050	80 1.5	110 47	60	85	3.5 1.6	-	0.25	1560	Air	-	1.1	-	-	0.04	-
Altheim	Austria	E+H	ORC - Turboden Hydrofluorocarbon Perfluoro-poliether	1998	2300	2200	82	106	60	85	11	-	1.00	2000	W 10	-	8000	5.1	0.10	0.04	-
Husavik	Island	E+H	Kalina - X-Orka	2000	5 x 400 à 1000	-	95	124	-	80	13	57'000	1.70	12'000	W 5	12	-	11	0.09	0.02	-
Chena Springs	Hot Alaska	E+H	ORC R134 a	2006	20 x 300	215	32	74	-	-	-	-	0.40	3'000	W 4+Air	8.2	-	2	0.07	-	-

Table 1: Summary table of the main values of 7 geothermal power plant

Quelques chiffres clés

- Le prix d'une installation ORC est d'environ 1500 €/kW_e
- La standardisation pour les petites installations permet de réduire le coût
- Prix de l'électricité entre: 0.17 €/kWh_e - Allemagne, Autriche
0.08 €/kWh_e - Alaska, Islande
- Prix de la chaleur entre: 0.05 €/kWh_{th} - Allemagne, Autriche
0.02 €/kWh_{th} - Alaska, Islande
- Rendement avec ORC de 6.5% avec de l'eau à 100° C jusqu'à 13% à 200° C
- Des rendements jusqu'à 15% pour les cycles de Kalina
- Le couplage d'un ORC à un système flash est rentable à partir de 5MW_e et 200° C
- Une source de chaleur constante pendant plus de 7000 h/année
- Retour sur investissement Unterrhaching: 15 ans

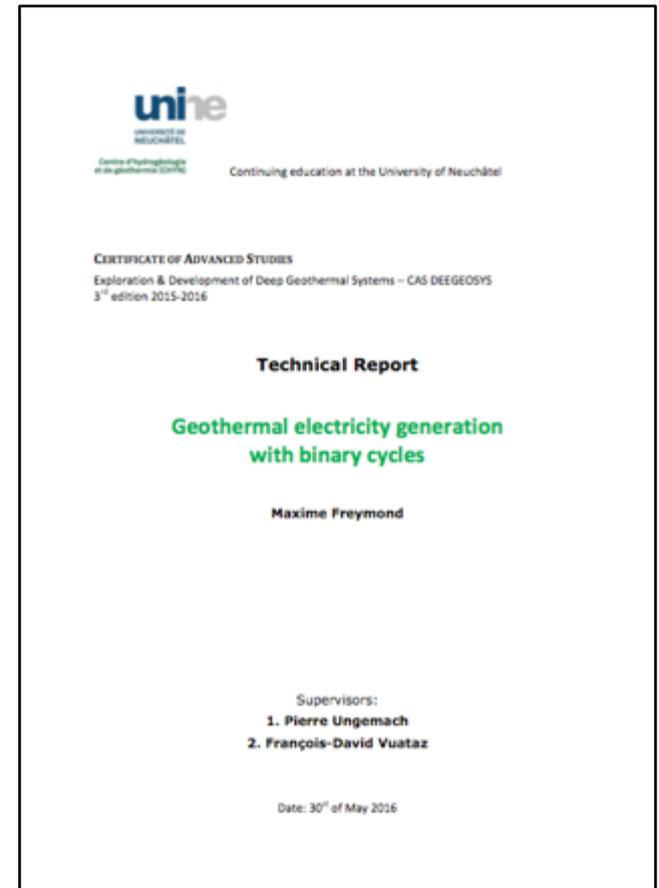
ATTENTION: Ces chiffres ne sont pas directement applicables à la Suisse.

Conclusion

- En Suisse, les températures entre 90 et 150° C requièrent l'utilisation d'ORC
- Les systèmes Kalina sont aujourd'hui préférés aux ORC pour les basses températures mais sont encore en phase d'amélioration.
- Cette technologie est prouvée efficace combinée à une utilisation étendue de la chaleur
 - Combinée à un CAD ou autre en-dessous de 200° C
 - Combinée à un système en cascade comme l'aquaculture, chauffage de serre, etc...
- La rentabilité de tels systèmes peut être améliorée de 3 manières:
 - Réduire l'investissement – **exploration du sous-sol** – amélioration de la technique
 - Optimiser l'utilisation de la chaleur – **analyse des besoins** – privilégier les systèmes basse temp.
 - Améliorer le rendement du système – **R&D** – ORC, Kalina, pompes immergées

Référence

- Université de Neuchâtel - CHYN
CAS DEEGEOSYS 2015-2016
Geothermal electricity generation with binary cycles
- Maxime Freymond
Tél: 024 426 02 10
E-mail: maxime.freymond@pacinfo.ch



Questions ?



Merci pour votre attention !