

COGÉNÉRATION/TRIGÉNÉRATION: ÉVALUATION DES OPPORTUNITÉS D'AMÉLIORATION DES PERFORMANCES DES SYSTÈMES DE VALORISATION DE CHALEUR

Webinaire ALLICE – 14/11/2023



Quelques informations pratiques

- Merci de couper vos micros et caméras
- Une session de questions-réponses est prévue après chaque intervention. Pour participer :
 - Utilisez le chat écrit
 - Précisez dans le chat si vous souhaitez intervenir à l'oral
- Les présentations seront disponibles sur l'extranet ALLICE sous quelques jours.
- Contactez le 06.19.36.09.81 en cas de souci technique.



Bon visionnage !

Sommaire

- **Restitution de l'état de l'art ALLICE :**
Cogénération/Trigénération: Evaluation des opportunités d'amélioration des performances des systèmes de valorisation de chaleur
- **Présentations :**
 - Contexte et introduction de l'étude – Planet Décarb
 - Concepts et technologies – Planet Décarb
 - Retour d'expérience – Schneider Electric
 - Retour d'expérience – Enertime
 - Enjeux énergétiques – Planet Décarb
 - Evaluation des opportunités de cogénération et trigénération – Planet Décarb
 - Conclusions et recommandations – Planet Décarb



Ahemd Bensafi
Plant Décarb



Christophe Prunet
Schneider Electric



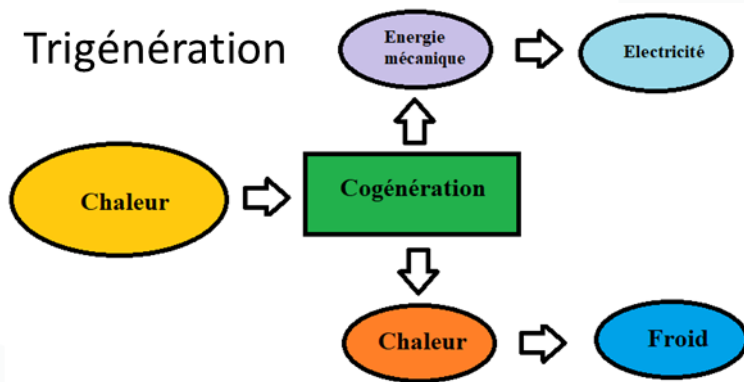
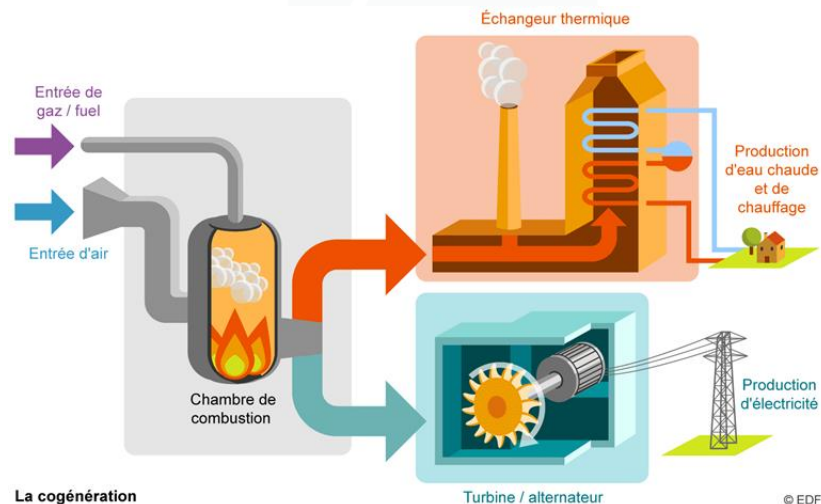
Thomas Delaire
Enertime

Contexte et Introduction de l'étude

Contexte et introduction

Valorisation de chaleur fatale - levier d'amélioration de l'efficacité énergétique des procédés par:

- L'exploitation directe de la chaleur résiduelles d'effluents des procédés, pour le chauffage (ou le refroidissement) d'autres effluents
- La transformation de cette chaleur sous d'autres formes d'énergies



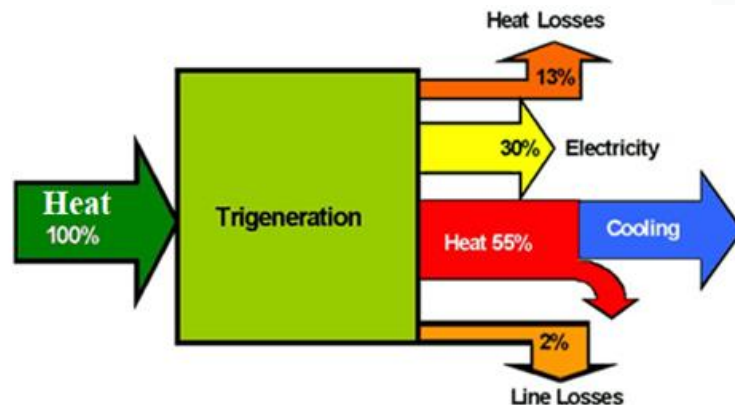
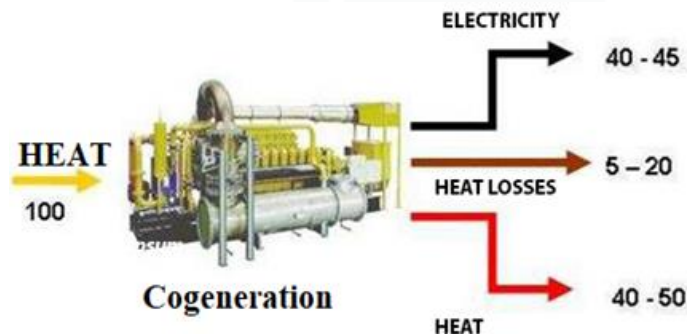
Contexte et introduction

- Technologies de valorisation de la chaleur fatale : Etudes ALLICE

Année	Composant	Etude
2022	Récupération de chaleur	Récupération de chaleur à très hautes températures
2022	Moteur thermique	Panorama technologies de conversion
2021	Production de froid	Froid performant dans l'industrie
2019	Production de froid	Technologies avancées et alternatives
2021	Compression de vapeur	Pompes à chaleur hautes températures
2020	Financement des projets	Couverture des risques de financement de projets
2022	Mise en oeuvre projets	Chaleur fatale : potentiel de déploiement des projets

Concepts et Technologies

- **Cogénération/Trigénération – mise en œuvre de:**
 - Dispositif de production (ou de récupération) de chaleur
 - Moteur thermique pour la conversion de la chaleur en travail mécanique
 - Convertisseur d'énergie mécanique en électricité (alternateur)
 - Convertisseur d'énergie thermique (ou mécanique) en froid (ou chaleur)
 - Echangeurs pour l'utilisation de la chaleur et du froid produits

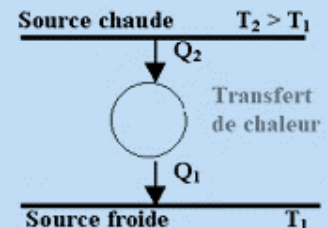
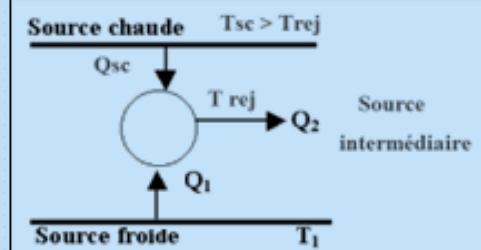


Concepts et Technologies

Concepts et Technologies : cas génériques

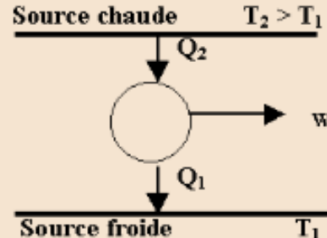
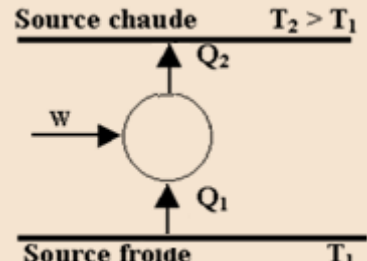
Ces transformateurs fonctionnent selon les principes de la thermodynamique.

- 1^{ère} loi : conservation de l'énergie
- 2^{ème} loi : la chaleur n'est spontanément transférable que de la haute vers la basse température.

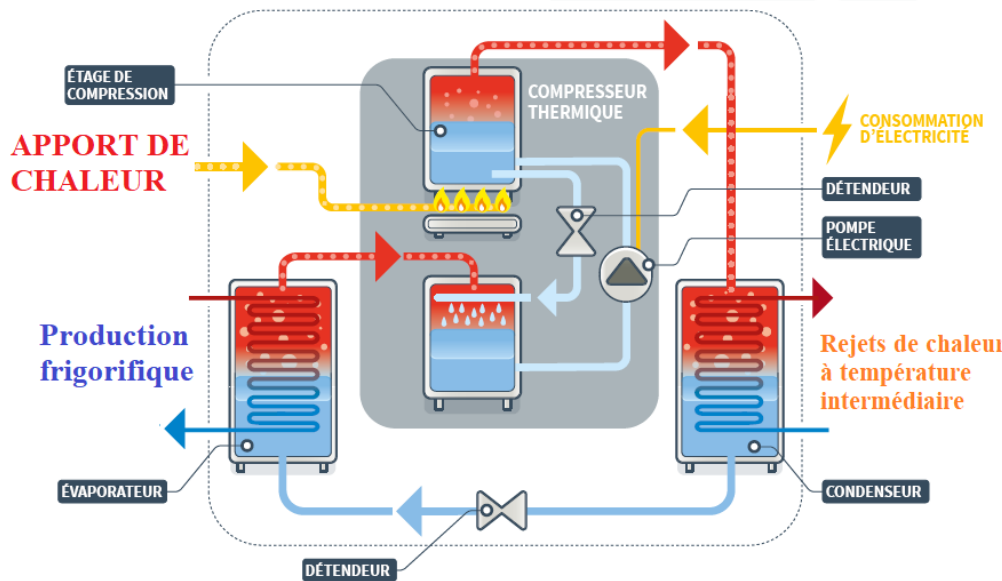
Cas	Transformation	Energies mises en jeu	Applications et technologies
1	Transfert de chaleur sans travail mécanique		Récupération de chaleur par <u>échangeurs thermiques</u>
2	Compression thermique		Production de froid par : - <u>Absorption</u> - <u>Adsorption</u> Rejet/Production de chaleur à une température intermédiaire

Concepts et Technologies : cas génériques

- En transfert spontané, la haute température peut générer du travail mécanique;
- Le transfert de chaleur de la basse vers la haute température (pompe à chaleur) a besoin de travail mécanique.

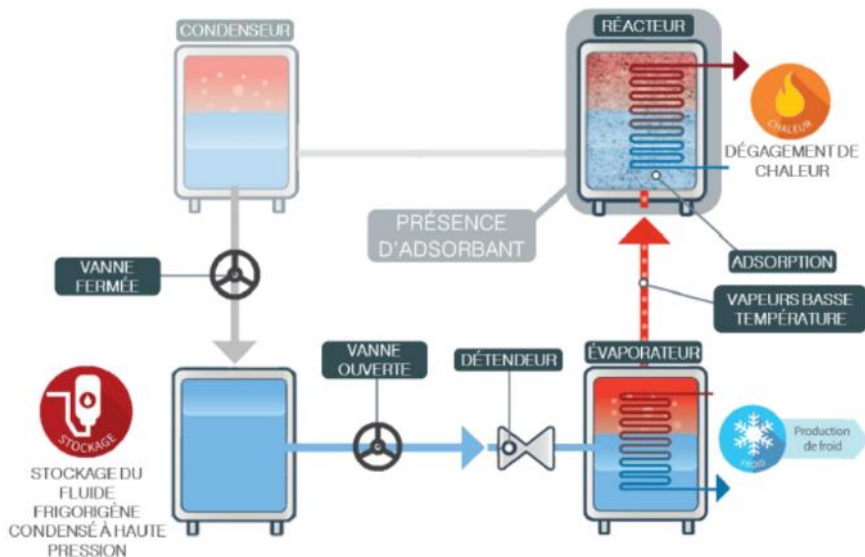
Cas	Transformation	Energies mises en jeu	Applications et technologies
3	Production de travail (force motrice) et de chaleur à partir d'une source chaude		Génération de puissance et d'électricité - <u>Turbogénérateur</u> - <u>ORC & similaires</u> Rejet/Production de chaleur à basse température
4	Transfert de chaleur vers un niveau plus élevé de température par travail mécanique		Cycle à compression de vapeur - Production de froid - Production de chaleur (<u>Réfrigération</u> et <u>Pompe à chaleur</u>)

Concepts et Technologies: froid par absorption



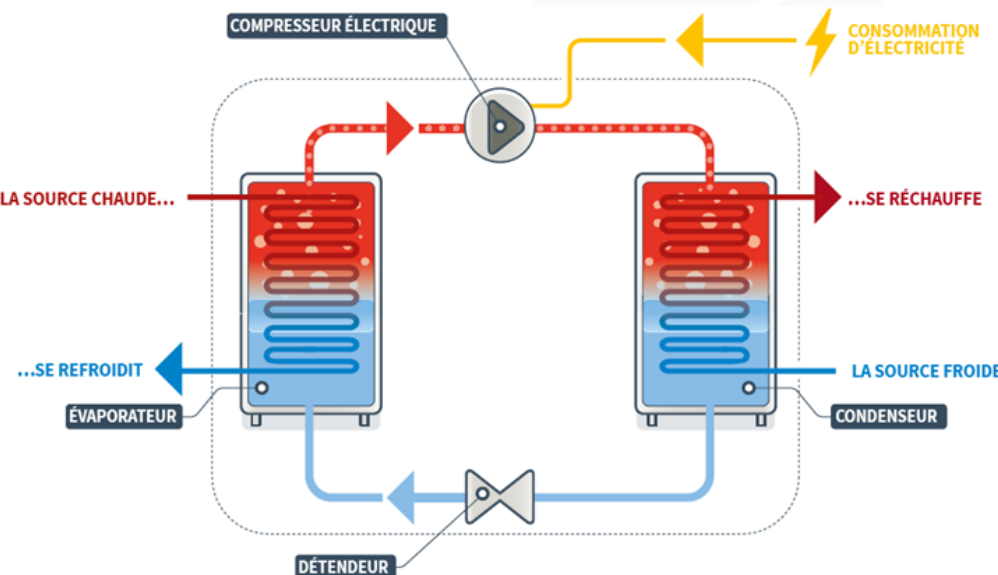
Principe thermodynamique transformations énergétiques	
Température source chaude Gamme de puissance froid Coefficient de Performance	80-150°C 15 kW- 20 MW Eau chaude 0.6-0.8 Vapeur (double effet) 1.2-1.3
Température froid	5°C (Eau/LiBr) & -50°C (Eau/NH3)
Rejets de chaleur Applications Coût installé	30-45°C Industrie, tertiaire 1500-2500 €/kWfroid

Concepts et Technologies: froid par adsorption



Principe thermodynamique transformations énergétiques		Source chaude $T_{sc} > T_{rej}$ Q_{sc} T_{rej} Source intermédiaire Q_2 Source froide T_1 Q_1
Température source chaude		A partir de 70°C
Gamme de puissance froid		5 kW- 2 MW
Coefficient de Performance		Eau chaude ~ 0.8 possible
Température froid atteignable		-20°C (système conventionnel à ammoniac)
Rejets de chaleur		30-40°C
Applications		Industrie, tertiaire
Coût installé		2000-2500 €/kWfroid

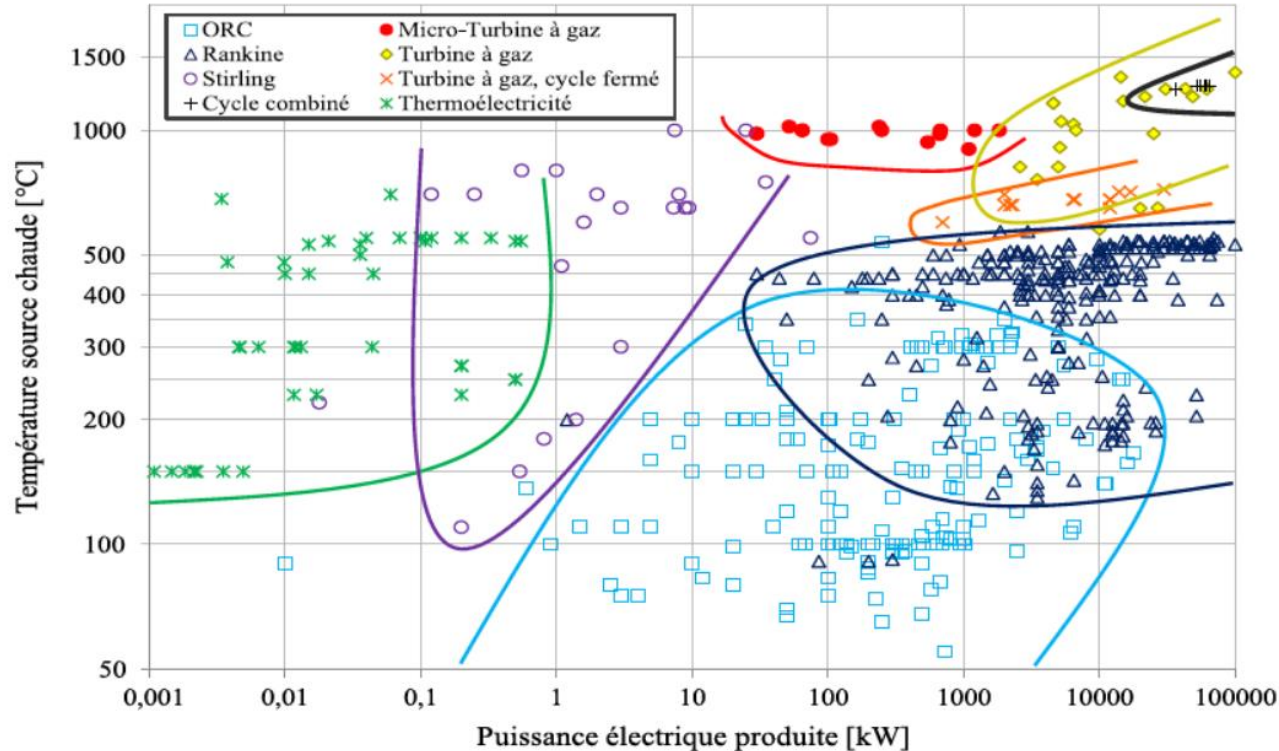
Concepts et Technologies: Pompes à chaleur



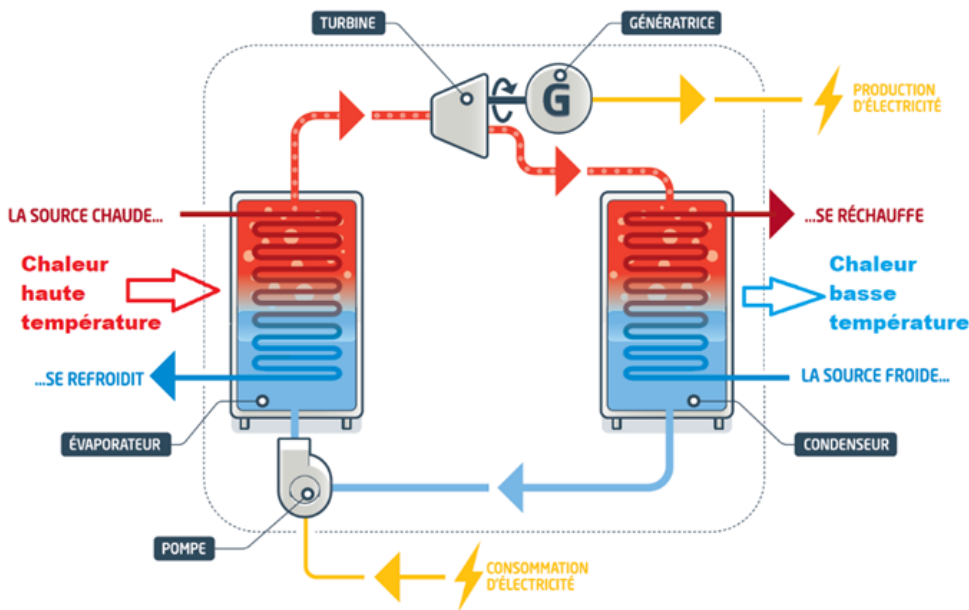
Principe thermodynamique transformations énergétiques	Source chaude $T_2 > T_1$ Q_2 W Q_1 Source froide T_1
Température source chaude	De -30°C à $+50^{\circ}\text{C}$
Gamme de puissance chaud	3 kW- plusieurs MW
COP	1.5-6 (selon températures)
Température chaud atteignable	55°C (HT) à 130°C (THT)
Rejets : production froid	-30°C à $+40^{\circ}\text{C}$
Applications	Industrie, tertiaire, résidentiel
Coût installé	400-700 €/kWfroid

Concepts et Technologies

- Moteurs thermiques – différentes technologies



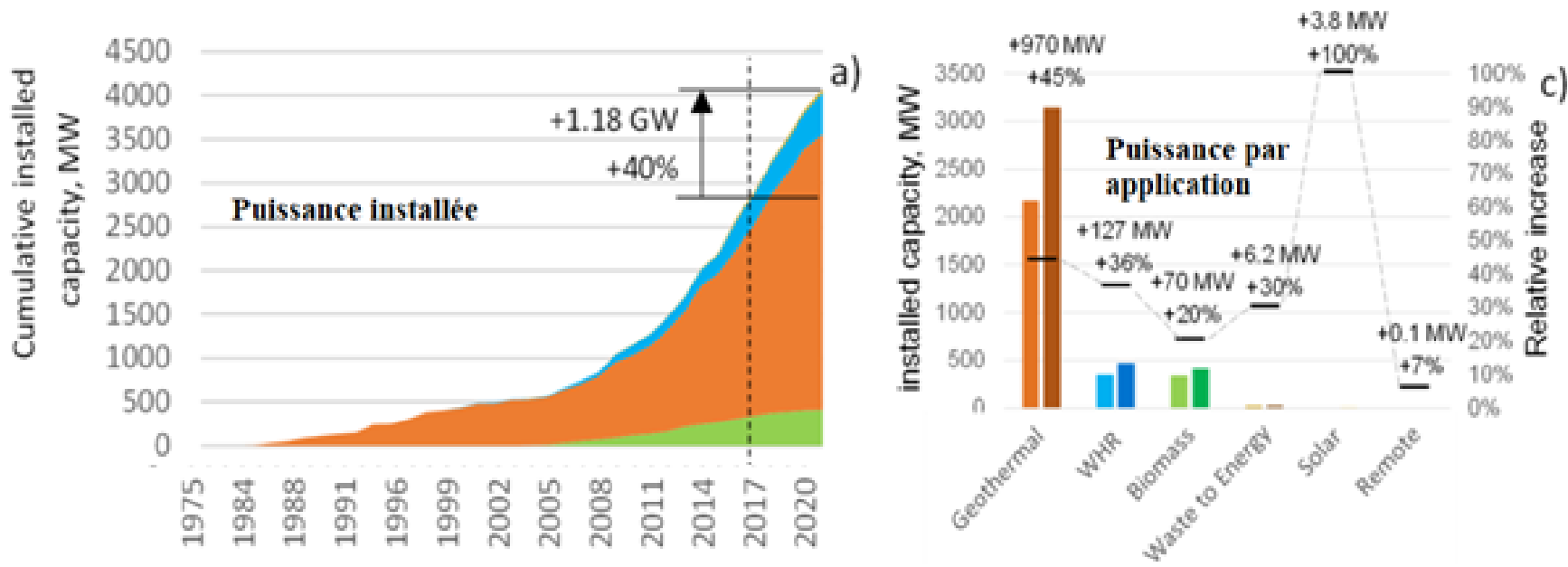
Concepts et Technologies: cycles ORC



Principe thermodynamique transformations énergétiques	
Température source chaude	A partir de 90°C
Gamme de puissance élec.	10 kW- 20 MW
Rendement	5-20% selon température
Rejets de chaleur	30-40°C
Applications	Géothermie, réseaux, industrie
Coût	2000-2500 €/kWe (récup. sur liquide) et 5000-5500 €/kWe (récup. sur gaz chauds)

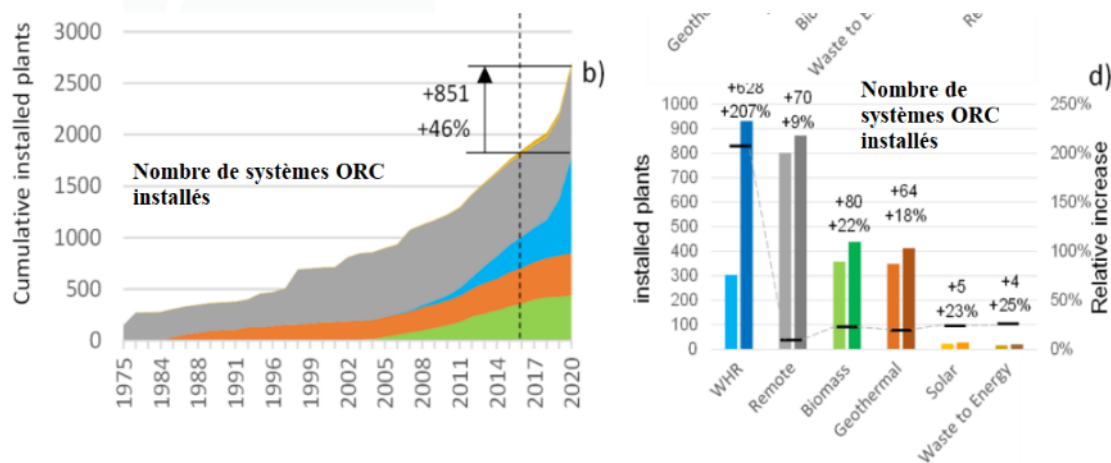
Concepts et Technologies: marché des ORC

- Les 2/3 des systèmes ORC sont installés dans le géothermique
- Valorisation de chaleur fatale : développements depuis 2005

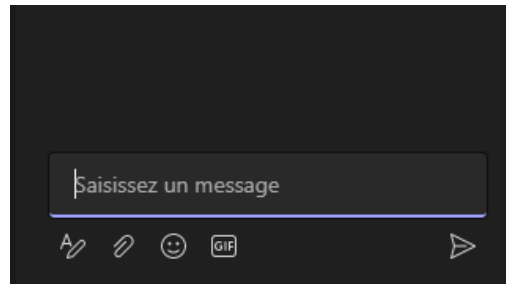
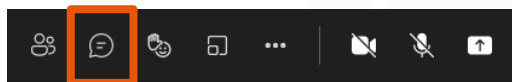


Concepts et technologies : marché des ORC

- A fin 2020, la capacité ORC globale installée cumulée était de 4.07 GWe.
- *Depuis 2016, le marché ORC global a augmenté de 40 % (+1.18 GW) en termes de puissance installée et de 46 % (+851) en termes de centrales installées.*
- **Augmentation de capacité entre 2016 et 2020**
 - plus forte augmentation due à la géothermie (+970 MW, +45%)
 - *les systèmes de récupération de chaleur ont la plus forte croissance en nombre de systèmes installés (628 centrales, + 207 %).*

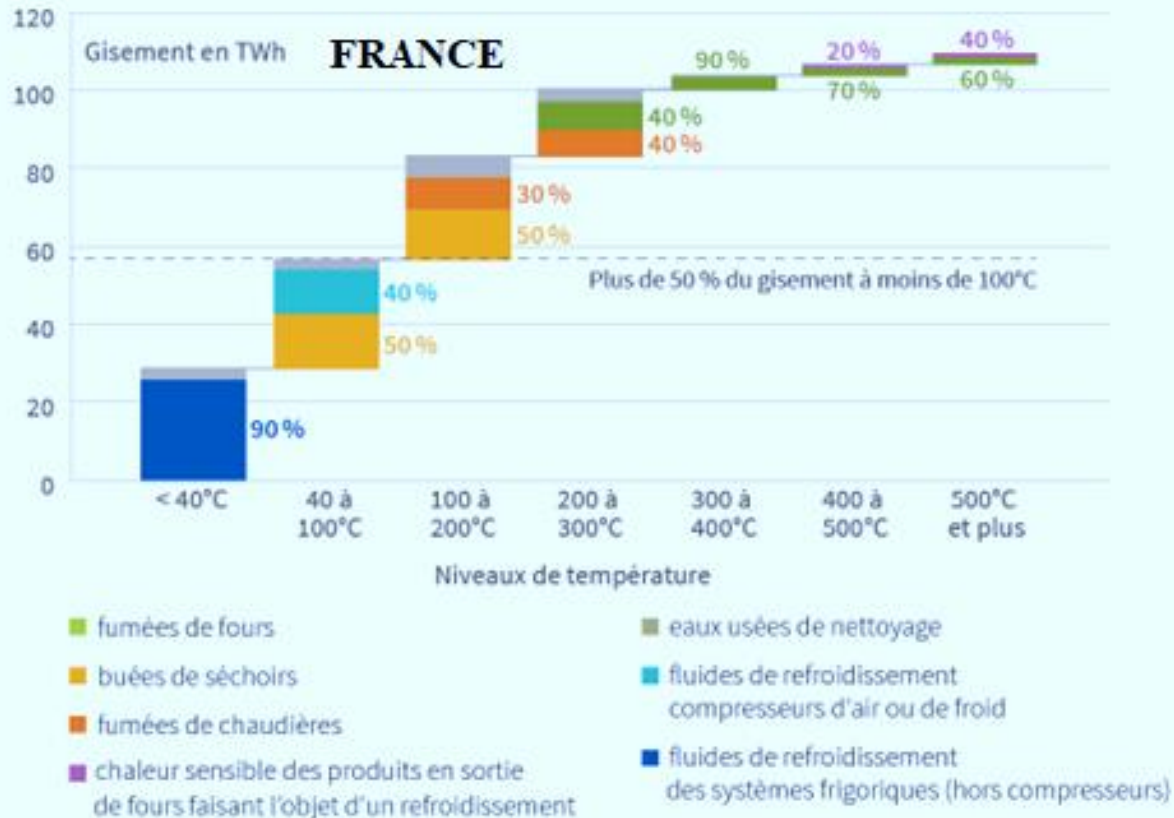


Posez vos questions !



Enjeux énergétiques

Enjeux énergétiques : potentiel en France



- Temp. > 100°C pour la moitié des rejets
- 100 < Temp < 200 °C (convient à la cogénération) pour un quart des rejets

Source ADEME

Enjeux énergétiques : potentiel en France

Gisements	GWh valorisés	Chaleur fatale valorisée (en % du gisement initial)	Gisement de chaleur fatale 2021 (en TWh)
Industrie	15,1	13,8 %	94,4
UIOM	3,0	67,7 %	1,4
STEP	0,1	18,9 %	0,3
DATACENTER	0,1	2,6 %	3,5
TOTAL	18,3	15,5 %	99,6



Source ADEME

- Estimation ADEME = 135 MWe net
- Estimation KORC = 1100 MWe net

Enjeux énergétiques : potentiel en France

<i>Secteurs d'activités</i>	<i>Répartition du gisement industrie de 109,5 TWh</i>	<i>Fourchette de températures principales des effluents</i>	<i>Fourchette de températures secondaires des effluents</i>
Agro-alimentaire	31 %	< 40 °C	100 – 250 °C
Chimie plastique	22 %	< 40 °C	100 – 250 °C
Papier carton	13 %	< 80 °C	100 – 250 °C
Métaux dont sidérurgie	12 %	200 – 250 °C	> 500 °C
Matériaux non métallique (ciment, verre)	11 %	100 - 250 °C	400 – 500 °C
Raffinage	3 %	200 – 250 °C	150 – 200 °C
Autres	8 %	NA	NA

Source ADEME

Enjeux énergétiques : potentiel en Europe

- Données KORC

Country	Clinker	Container Glass	Flat Glass	Paper	Primary steel	Second. steel	Chemicals	Food and Beverages	Refinery	Total
Belgium	33.4	0	12.1	8.1	14.9	0.3	391.2	130.5	11.2	602
Denmark	9.5	0	0	1.9	0	0	26.1	54.5	2.6	95
France	85.5	36.9	12.1	32.5	32	0.7	453	427.3	20	1100
Germany	164.2	47.3	19.2	89.4	89.8	1.6	1367	486.4	32.6	2298
Italy	98.6	41.3	12.1	34.3	19.7	2.2	357.4	266	23.3	855
Netherlands	13	0	0	11	20.6	0	666.8	193.5	19.8	925
U.K.	43.1	26.7	9.1	17.4	30.6	0.2	300.2	254.7	19.8	702
Total	447.3	152.2	64.6	194.6	207.6	5	3562	1813	129.3	6577

Enjeux énergétiques : potentiel en Europe

- Données Campana et al.

Process	Heat source temp (°C)	P _{sORC} (kW/t)	Plants	ORC power (MW)
Flat Glass	500	2.33	58	79
Clinker Prod.	350	1.01	241	574
EAF	250 ^a	27.8	190	438
Rolling mills	400	6.87	209	310
GCS and GSF		30% ^b	613	1304
Total				2705

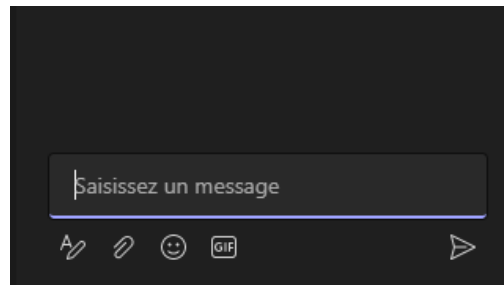
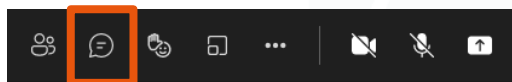
^a Steam from heat exchanger.

^b Percentage of gas turbine Power.

Enjeux énergétiques

- **Conclusion : potentiel très important pour la cogénération à partir de chaleur fatale en Europe et en France, en particulier dans les secteurs industriels suivants :**
 - chimie et pétrochimie,
 - industries de transformation des matériaux (verre, ciment, acier, etc.),
 - centrales de compression de gaz naturel.

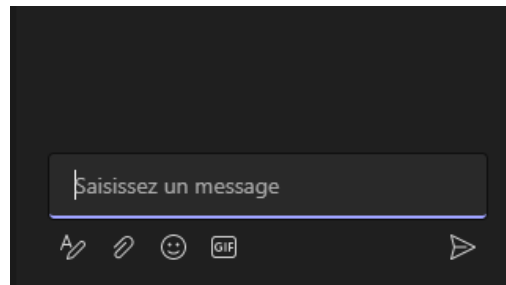
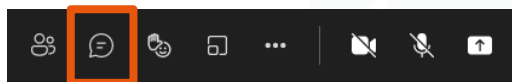
Posez vos questions !



Retour d'expérience



Posez vos questions !



Retour d'expérience



Le futur de l'industrie électromécanique



- > PME industrielle créée en 2008, **cotée sur Alternext depuis 2016** et sise à Courbevoie
- > 60 employés - une activité **R&D représentant 15 à 20% du CA**
- > **Un positionnement unique** comme équipementier turbomachines (turbines and compresseurs) sur 3 technologies : les systèmes ORC les PAC HT et les turbines de détente de gaz naturel
- > Un changement de paradigme **Efficacité Energétique as a Service à travers notre filiale** proposant des modèles hors-bilan tiers financés



La technologie ORC - REX

UVE SIRAC Colombelle - 116 kt déchets

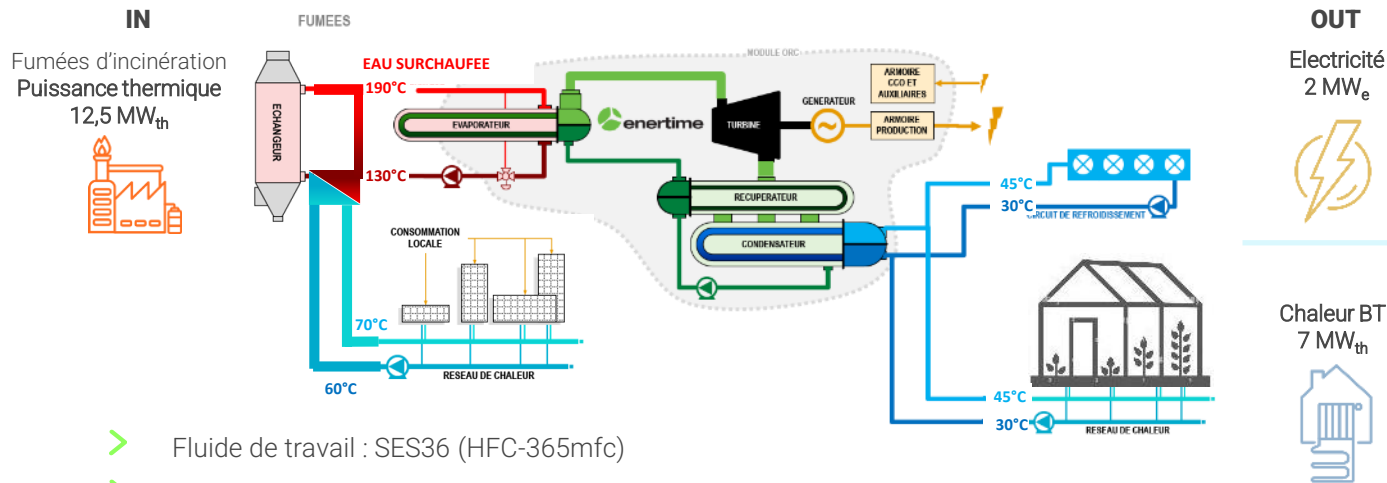


- > Deux lignes d'incinération 7,5 t/h en parallèles ;
- > Circuit d'eau surchauffée 190°C / 24 bars situé dans les hottes aspirantes en amont du traitement de fumées ;
- > Alimente le réseau de chaleur urbain, l'ORC et les serres ;
- > Température des fumées estimée 900°C.



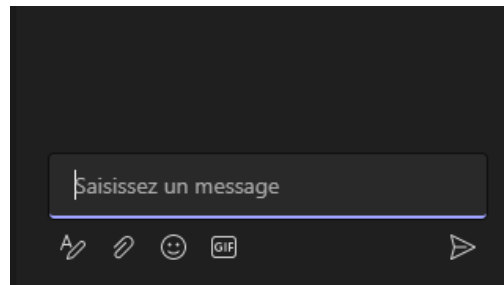
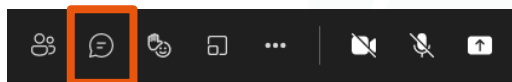
La technologie ORC - REX

UVE SIRAC - ORC 2MW au refrigerant



- Fluide de travail : SES36 (HFC-365mfc)
- Générateur asynchrone 1,8MW - 6,6 kV - 50 Hz - triphasé
- Fonctionnement annuel 8 380h/an – électricité valorisée 10 000 MWh_e/an
- Mise en service 2017

Posez vos questions !



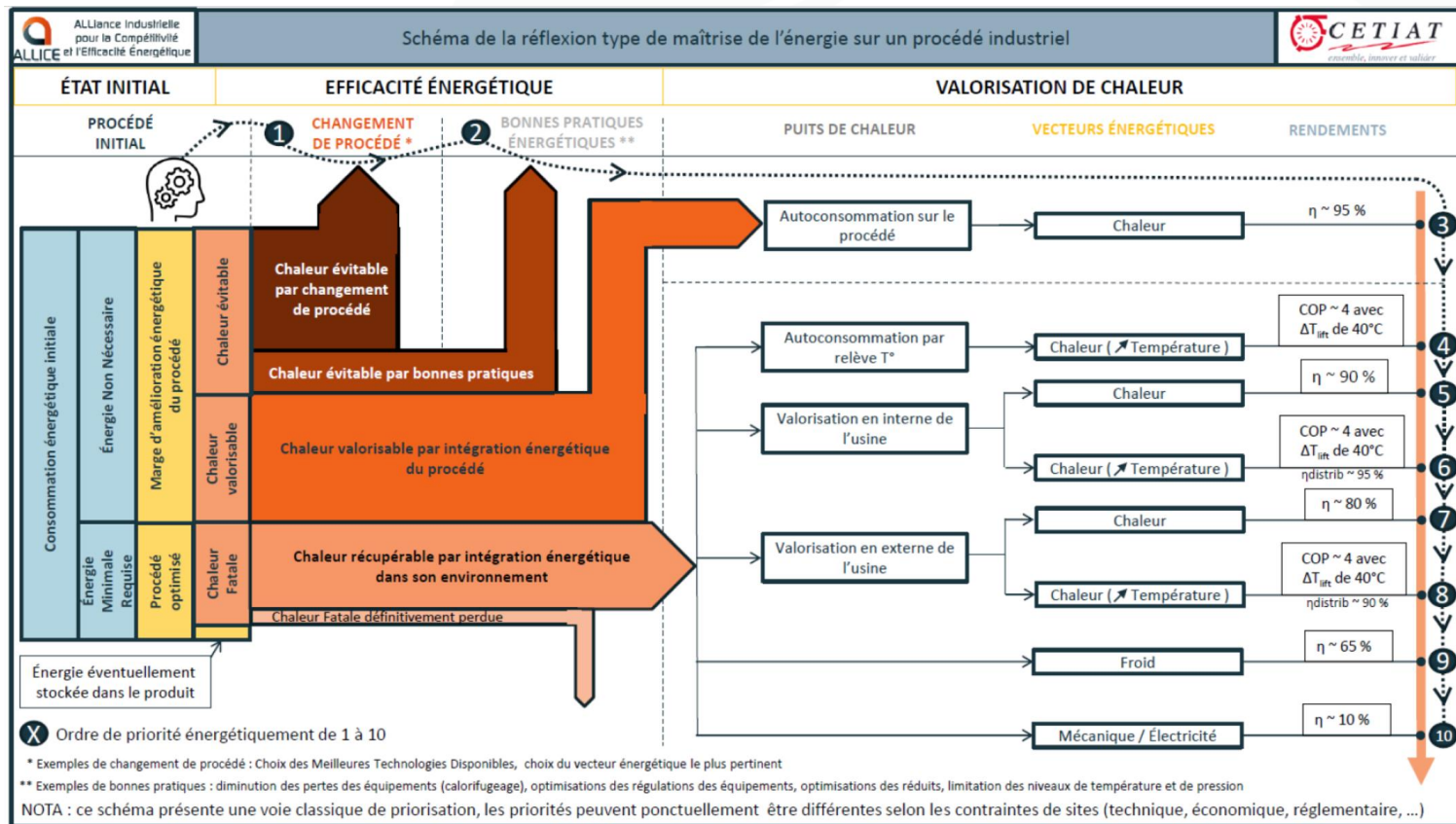
Evaluation des opportunités de cogénération et trigénération

Evaluation des opportunités de cogénération et trigénération

- Installations existantes en France (exploitant la chaleur fatale) :
 - Données difficiles à obtenir;
 - La plupart des systèmes de cogénération/trigénération ont bénéficié de subventions;
 - ORC alimentés par la chaleur fatale encore assez peu répandus; leur chaleur rejetée est rarement utilisée (température rejets thermiques basse);
 - Chaleur fatale rarement valorisée pour produire du froid ; adsorption encore très marginale et les rares installations sont basées sur la technologie de l'absorption. Systèmes souvent installés dans des réseaux de chaleur et utilisent une partie de la chaleur produite par des chaudières (très souvent à biomasse).
 - Systèmes de trigénération alimentés par chaleur fatale encore très rares. Composants souvent pas installés en même temps.
 - Chaleur produite souvent achetée avec contrat « take or pay » (clause de livraison minimum). Ex: système à absorption utilisé pour la clim. en été (conso eau chaude)
 - Dans les réseaux froid urbains, moins de 1% du froid produit par absorption.

Evaluation des opportunités de cogénération et trigénération

- Avant mise en œuvre, établir ordre de priorité. Cogé meilleure option ?



Evaluation des opportunités de cogénération et trigénération

- **Check list préliminaire:**

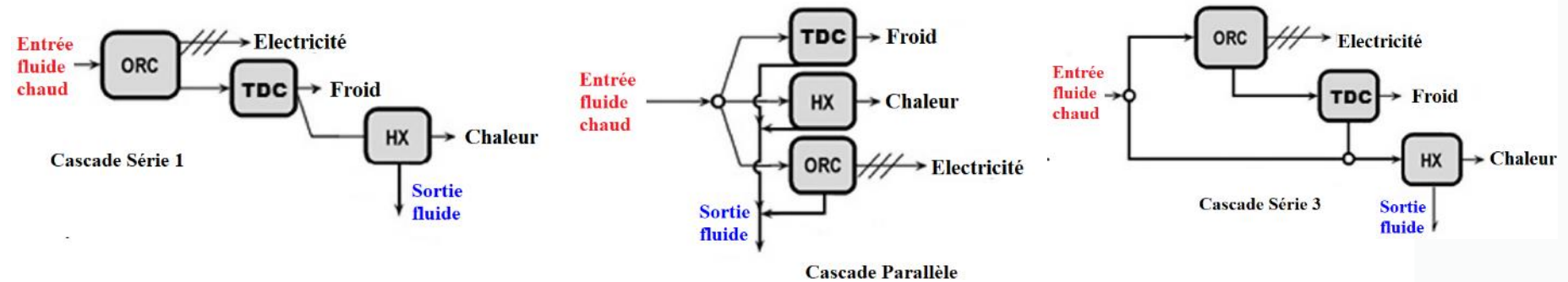
- Nature des effluents (liquide, gaz) : liquides avec températures plus basse et échangeurs plus compacts (coûts plus bas).
- Disponibilité de la chaleur fatale (flux continu, cyclique, intermittent) et débit.
- Profil dynamique des températures des effluents (constant ou variable).
- Taux de charge et disponibilité annuelle de la source de chaleur fatale.
- Pression des effluents (positive ou négative) et sa variabilité (constante, variable).
- Composition des effluents rejetés.
- Présence de contaminants susceptibles d'endommager l'équipement de récupération de chaleur (corrosion, érosion, etc.).

Evaluation des opportunités de cogénération et trigénération

- **Stratégie de couplage des composants de conversion de chaleur**
 - Selon les besoins du site, comment alimenter en chaleur les différents composants (ORC, réseau de chaleur, groupe froid absorption...) ?
- **Etudes paramétriques:**
 - Coût de l'électricité produite par un ORC (OPEX + CAPEX) – en €/kWh_e
 - Comparaison des coûts pour la production de froid (€/kWh_{froid})
 - Compression mécanique vs Absorption
 - Coûts de production incluant OPEX & CAPEX

Stratégie de séquençage des composants

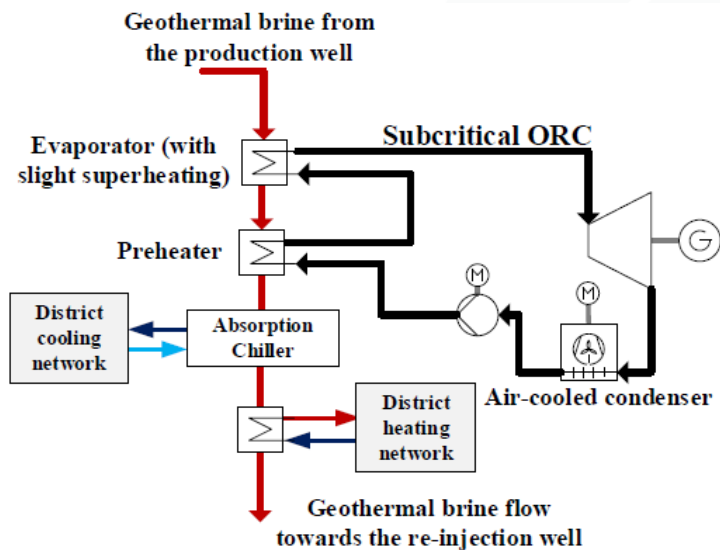
- Deux classes de couplage possibles:
 - Alimentation en chaleur fatale des composants en série, en parallèle ou mixte;



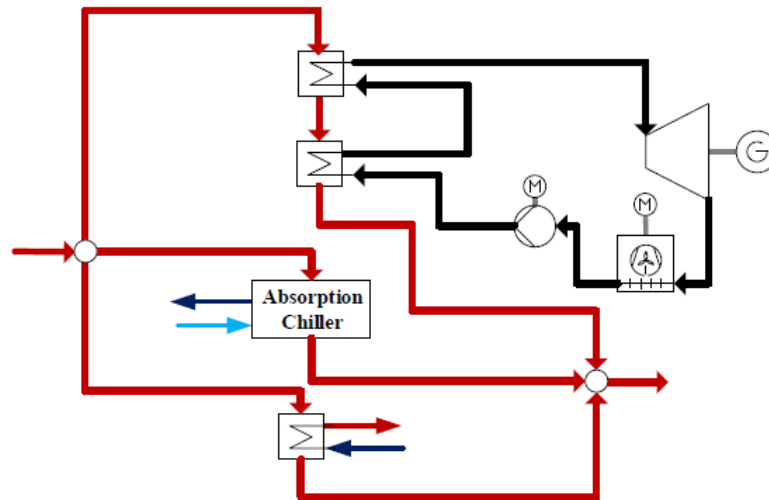
- La chaleur rejetée par un composant (par exemple condenseur ORC) est:
 - Non valorisée;
 - Valorisée par un autre composant : « Cascade thermique »

Stratégie de couplage des composants : exemples

- La température d'entrée dans les composants dépendra du montage



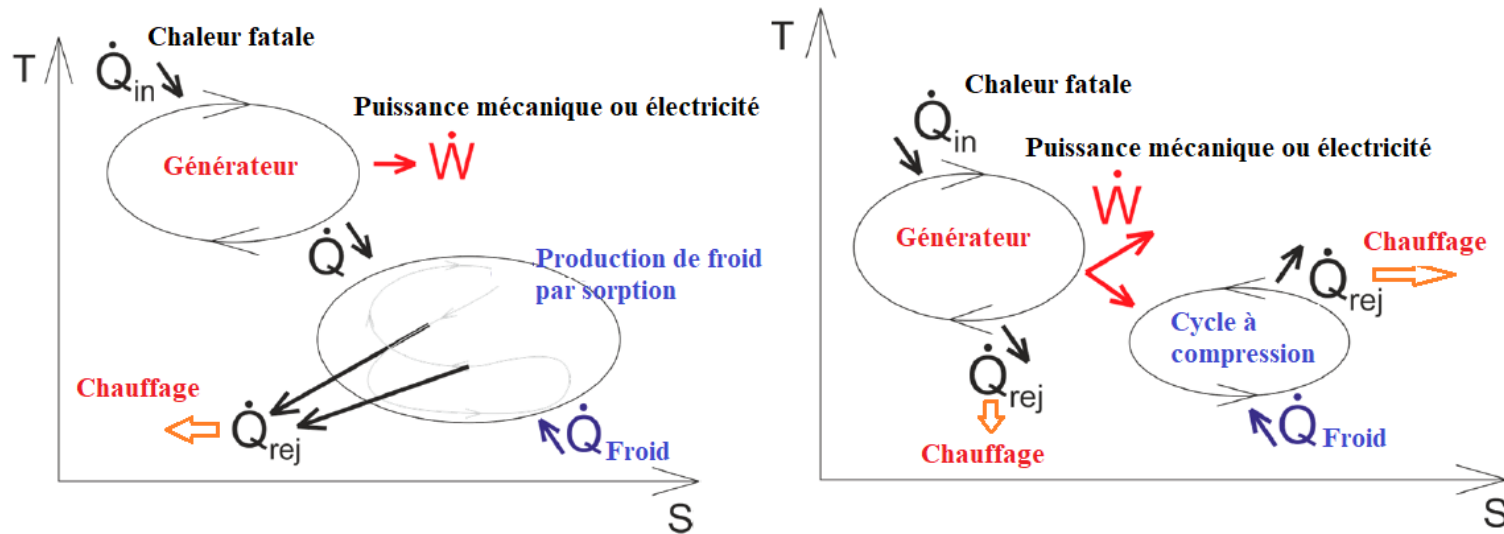
(a) Serial concept (SC)



(b) Parallel concept (PC)

Stratégie de couplage des composants : cascade thermique

- Exemple : réseaux urbains couplés avec incinérateurs ordures ménagères
- Applicable dans les reseaux de chauffage “basse temperature”



Stratégie de couplage des composants : alimentation chaleur

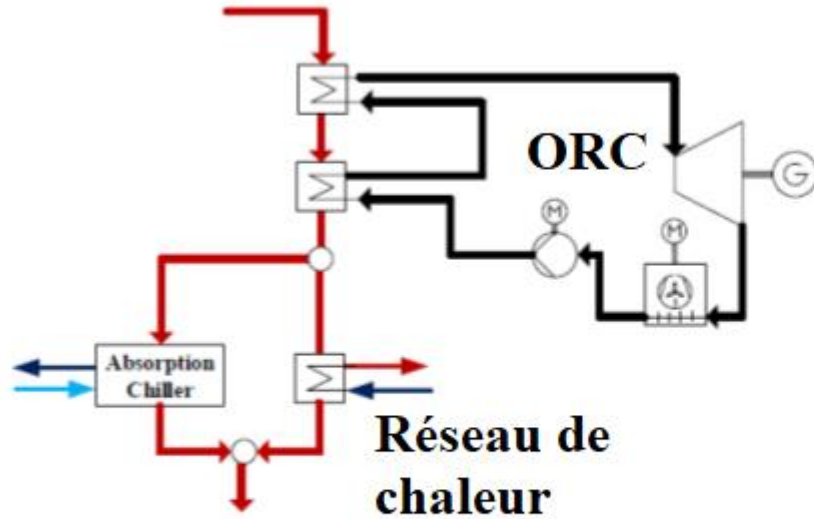
- **ORC toujours alimenté en premier (température et débit maximal des effluents chauds). Si demande de chauffage saisonnier, prévoir un débit variable sur ORC (by-pass).**
- **Alimentation du réseau de chauffage**
 - Réseau à très basse température (40°C max) : utiliser la chaleur issue des rejets des composants (mode Cascade thermique).
 - Réseau basse température (ex.50°C) : utiliser mode Série, avec réseau de chaleur en dernier composant, héritant ainsi des rejets thermiques les moins chauds du réseau de chaleur fatale
 - Réseau à température élevée : utiliser le mode Parallèle (puissance thermique disponible pour ORC diminuée).

Stratégie de couplage des composants : alimentation chaleur

- **Alimentation d'un système à absorption :**
 - dépend de la température des effluents rejetés et de la demande énergétique du site (température élevée, mais inférieure à environ 110°C).
 - En Parallèle d'un ORC (au risque de diminuer la puissance électrique disponible)
 - En série et en aval d'un ORC (selon température effluents)
 - Peut être alimenté en parallèle d'un réseau de chauffage (besoins en froid et en chauffage simultanés ou pas) ou en série (réseau de chauffage basse température, et production de froid augmentée). Dans les deux cas, un by-pass permettra de varier le débit des effluents (si demande saisonnière).

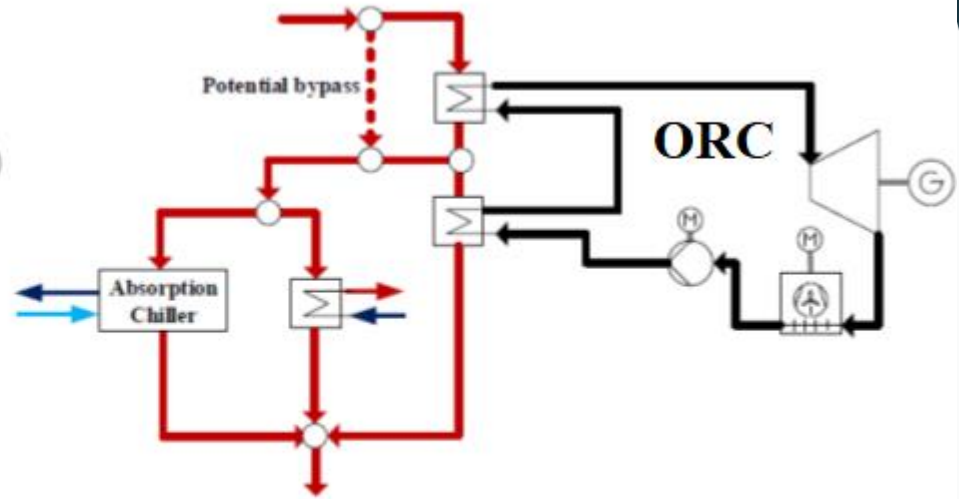
Stratégie de couplage des composants : exemples

- Demande saisonnière : utiliser un by-pass pour réguler le débit



(c) Serial-parallel concept (SPC)

ORC en premier, froid et reseau chaleur en //

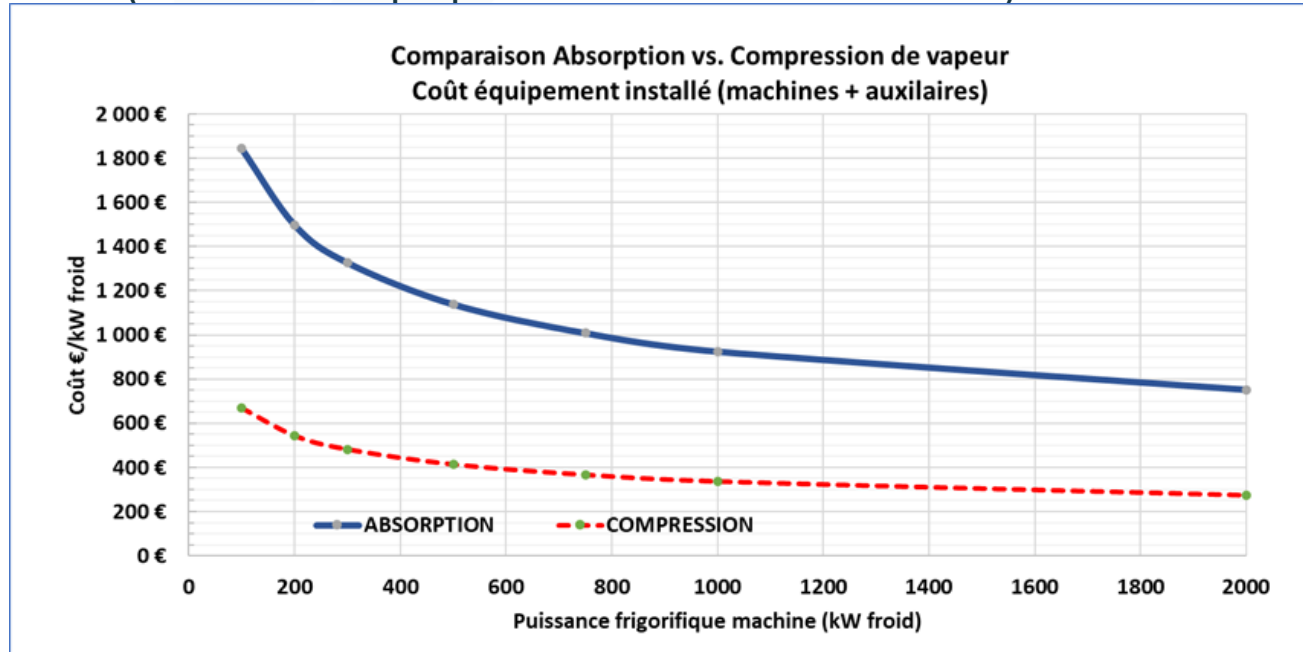


(d) Advanced serial-parallel concept (ASPC)

ORC en premier avec BYPASS,
froid et reseau chaleur en //

Coûts de production froid Absorption vs Compression vapeur

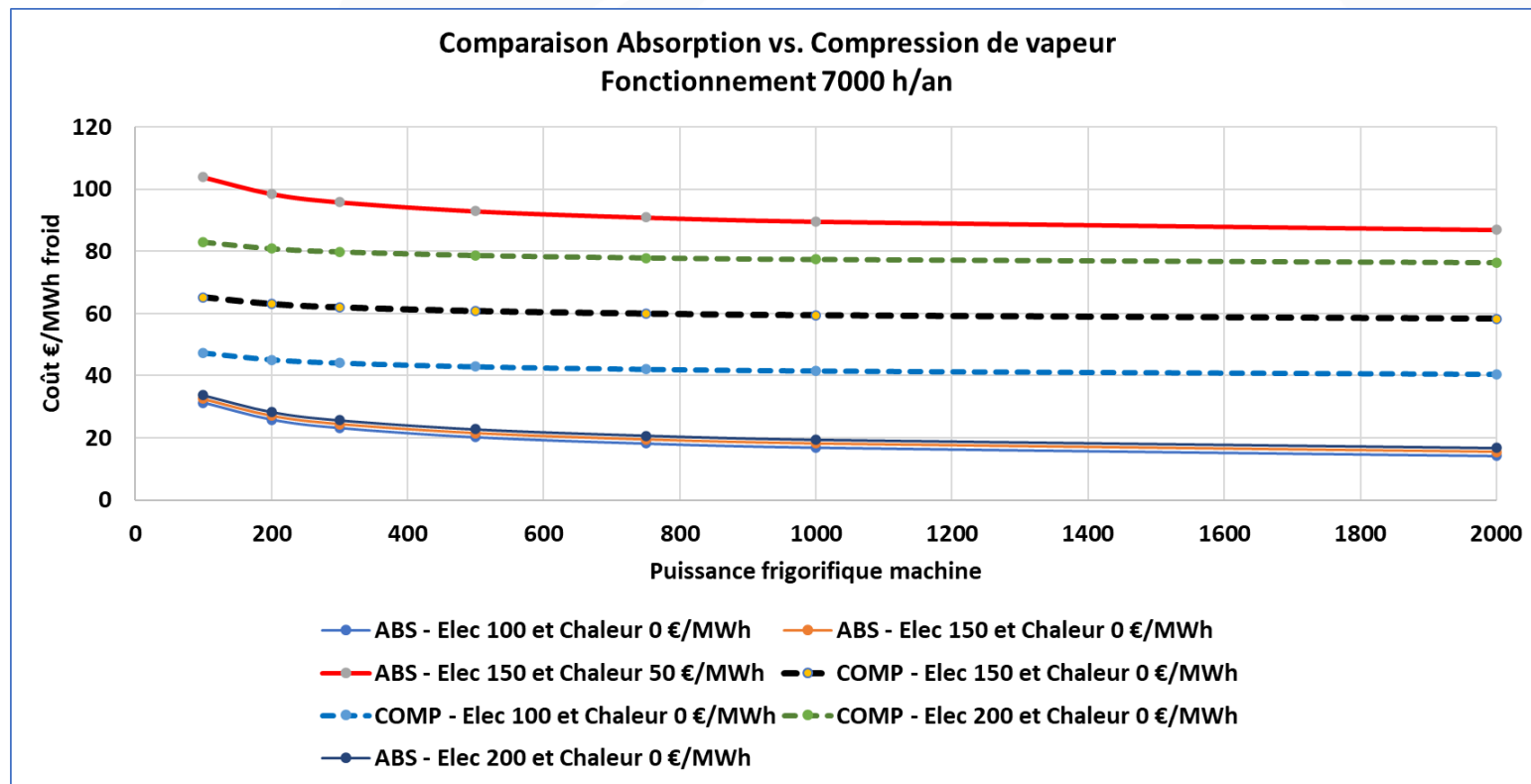
- Absorption nombre d'échangeurs X (3- 4), donc coût du système à absorption 2 à 4 fois plus important. C
- APEX et coûts de maintenance : beaucoup moins d'effet sur les longues durées d'exploitation (effet s'estompe pour P froid > cirac 750 kWf).



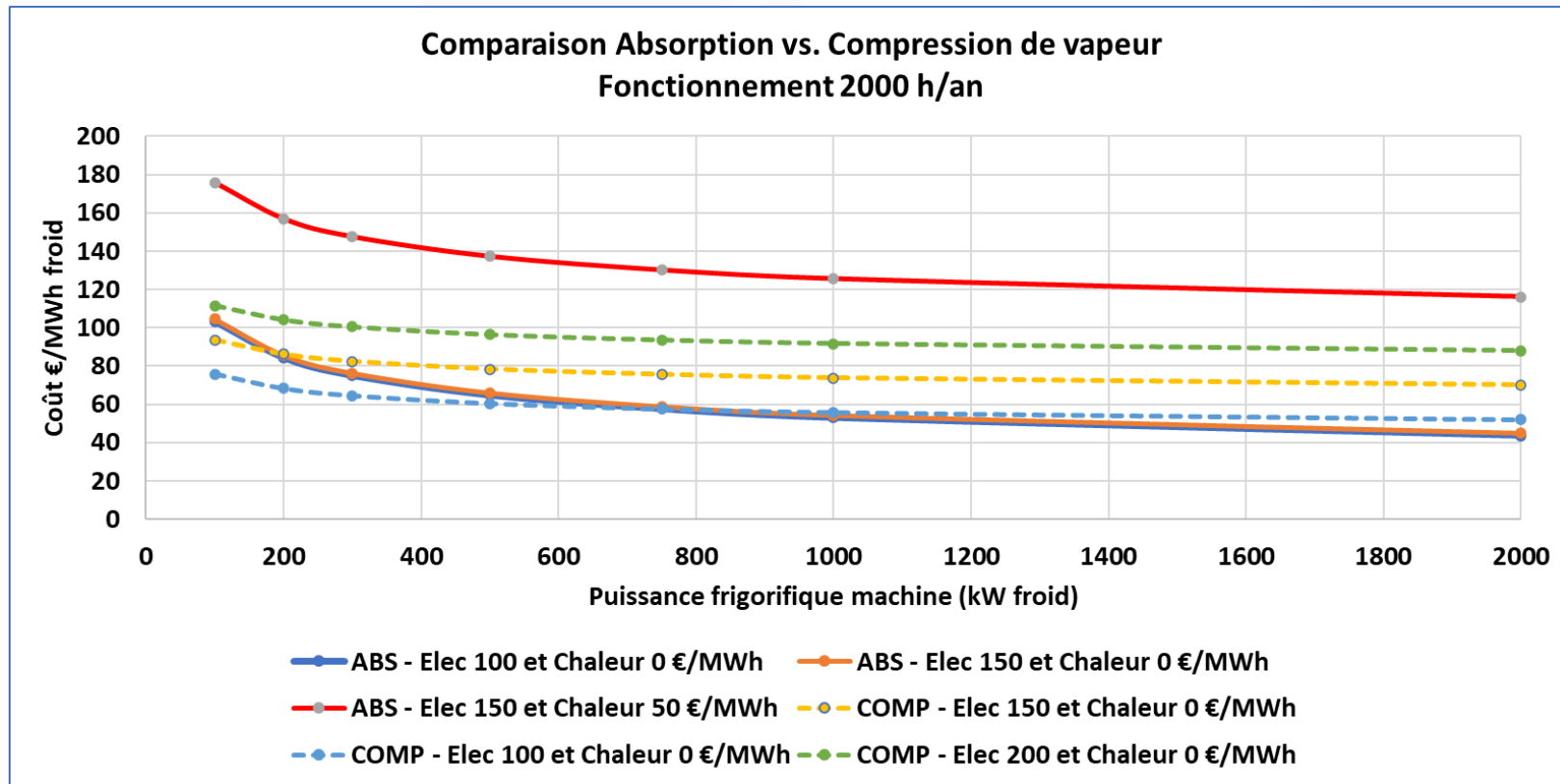
Absorption vs Compression de vapeur

- Pour 1000 h/an, l'absorption ne revient moins cher que si la chaleur fatale est gratuite. A partir de 1000 kW froid, c'est le coût de l'électricité qui devient déterminant.
- A partir de 3000 h/an, l'absorption est meilleure que la compression de vapeur à partir de 200 kW froid environ, si la chaleur fatale est gratuite et l'électricité à moins de 150 €/MWh.
- Pour 7000 h/an, la production par absorption coûte au moins deux fois moins cher que la compression de vapeur pour toute la gamme de puissance examinée, si la chaleur fatale est gratuite et l'électricité à moins de 150 €/MWh.

Absorption vs Compression de vapeur

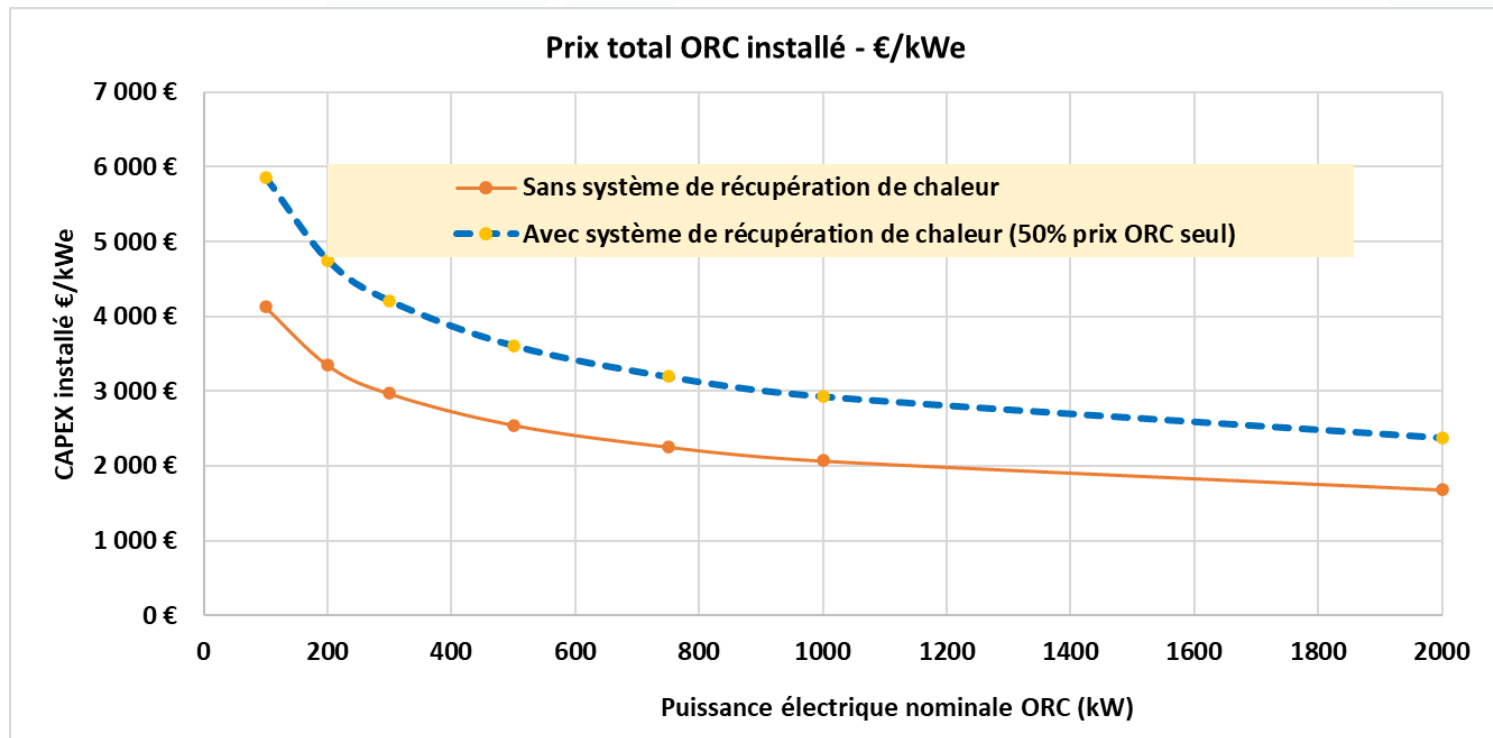


Absorption vs Compression de vapeur



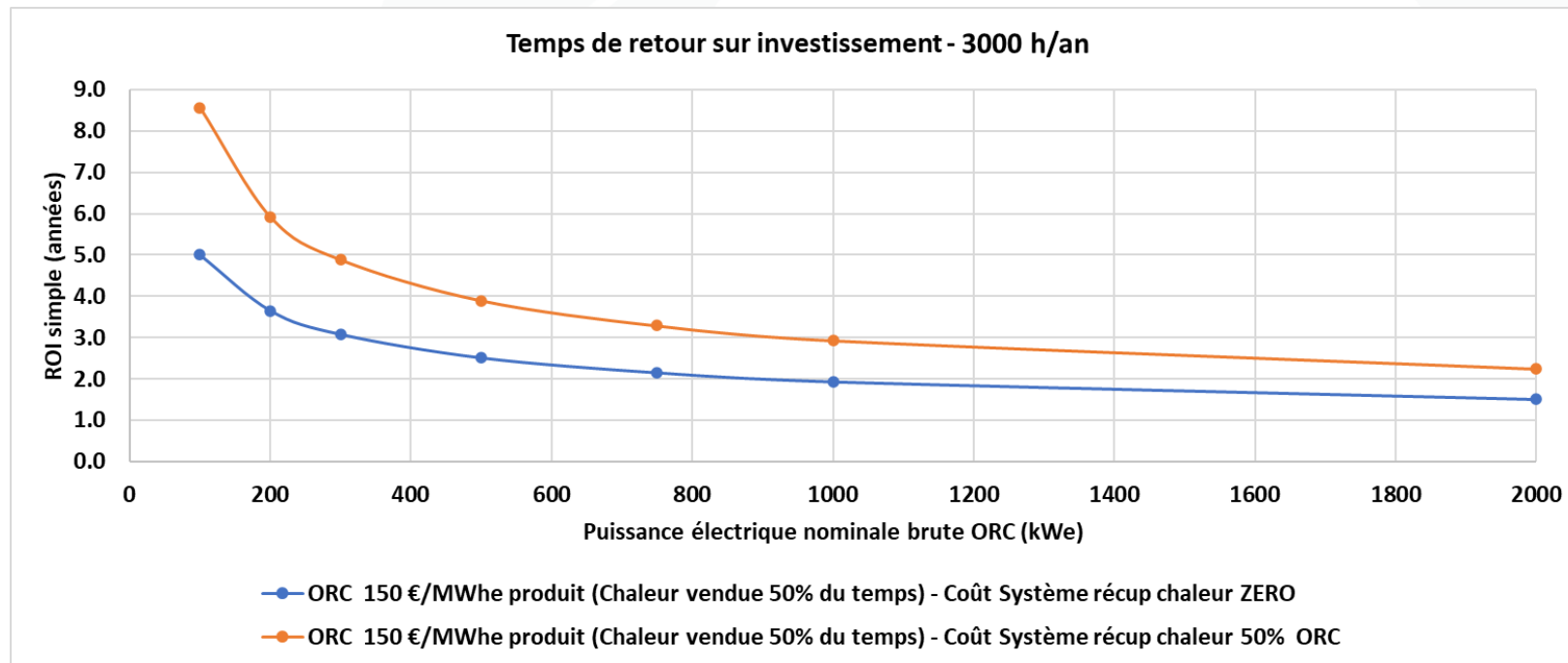
Coûts de production ORC

- CAPEX : forte influence du système de récupération de chaleur fatale



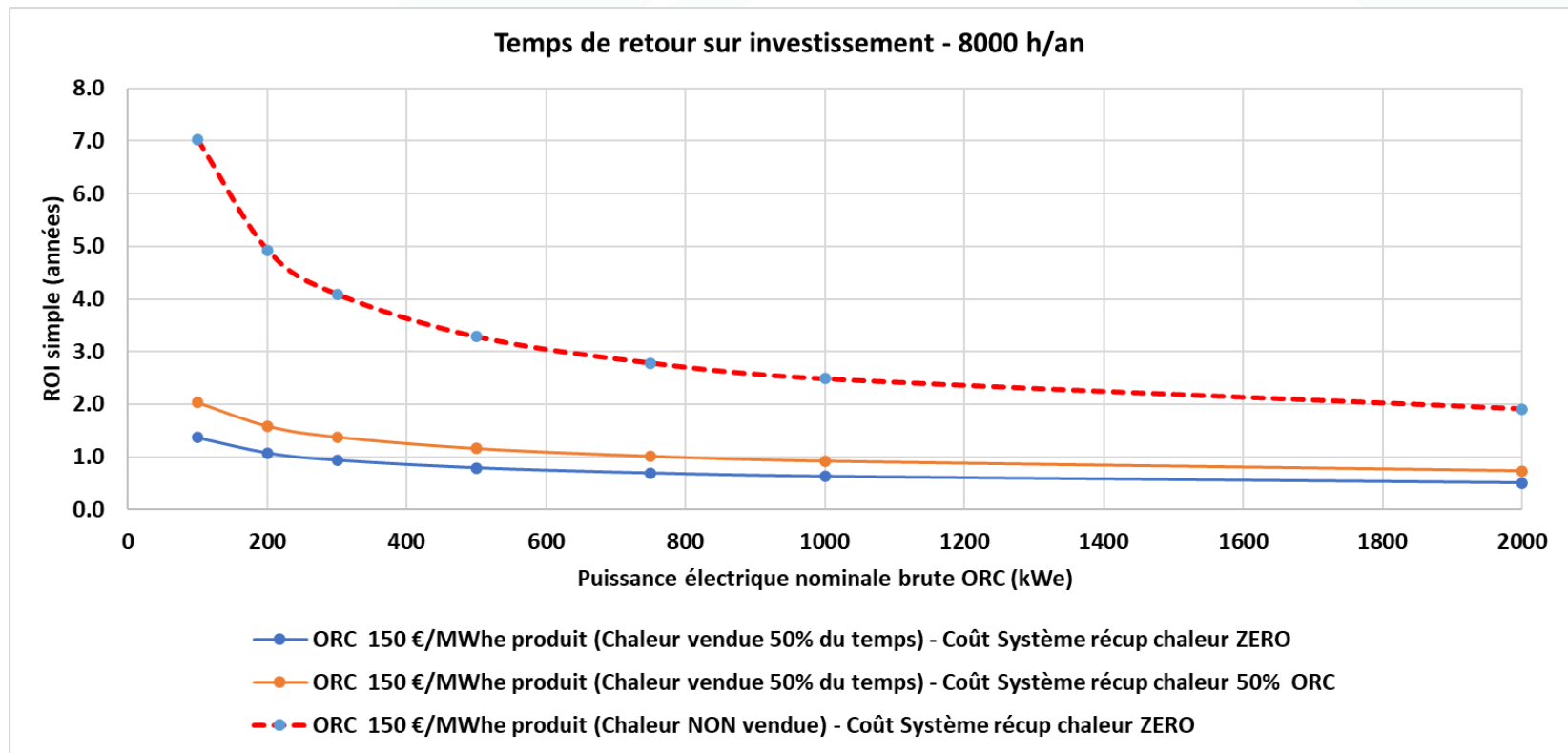
Coûts de production ORC

- 3000 h/an

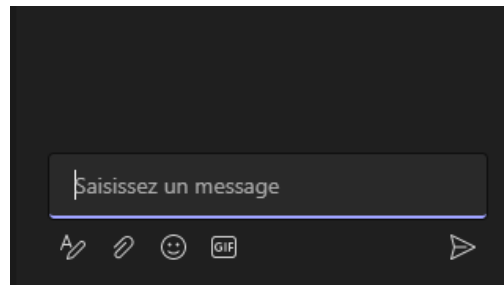
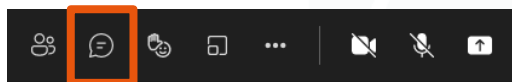


Coûts de production ORC : vente de chaleur rejetée

- 8000 h/an



Posez vos questions !

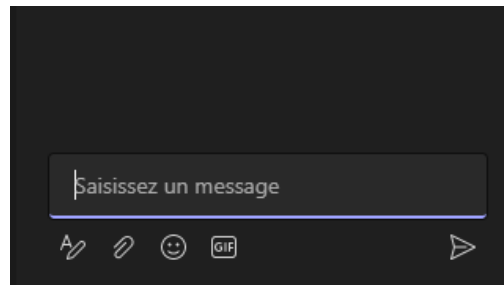
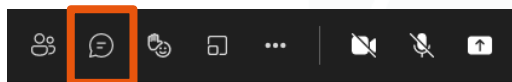


Subventions et financements

Subventions et financements

- Il n'existe pas de dispositif d'aide financière *ad hoc*
- Principaux dispositifs « cadre »:
 - Fonds Chaleur de l'ADEME (chaleur > 1000 MWh/an – circa 170 kW)
 - Fonds Décarbonation de l'Industrie,
 - Certificats d'Economies d'Energie (CEE)
 - autres dispositifs de financement à l'échelle européenne (FEDER, etc)
- Note : ces dispositifs peuvent être sollicités au moins pour le système de récupération de chaleur

Posez vos questions !



Conclusions et recommandations

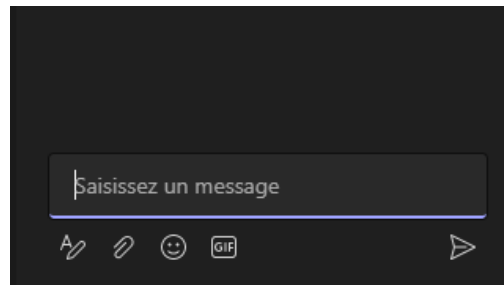
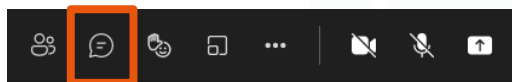
Conclusions

- La méthodologie de déploiement et de mise en œuvre doit inclure toutes les options afin de diminuer au préalable la consommation énergétique du site;
- La cogénération et la trigénération permettent d'augmenter de manière significative l'efficacité énergétique des sites industriels en convertissant la chaleur fatale en électricité, en froid et en chaleur à plus basse température;
- Selon les durées d'exploitation, ces systèmes peuvent générer des gains d'énergie et des économies très substantielles, avec des temps de retour sur investissement intéressants;
- Les besoins et contraintes d'utilisation des énergies produites doivent être prises en compte dans la conception du système;

Conclusions

- Le couplage (série, parallèle et hybride) des différents composants (ORC, froid et réseau de chauffage) dépendra des besoins (températures, puissances et variation saisonnière)
- Il n'existe pas de dispositif ad hoc pour le financement de système de cogénération et trigénération; néanmoins, les dispositifs existants s'appliquent au moins aux systèmes de collecte de chaleur fatale;
- Des dispositifs d'aides sont nécessaires afin de promouvoir ces technologies.
- *Un travail est actuellement mené par l'Alliance ALLICE et certains de ses membres pour étudier la faisabilité d'une fiche d'opération standardisée CEE pour ces systèmes.*

Posez vos questions !



Animation de la communauté et valorisation de la filière

Calendrier 2023

Webinaire
adhérents

14 novembre

Cogé / trigré :
performances des
systèmes de valorisation
de chaleur fatale

Déjeuner
Q&R

15 novembre

Séances de
questions/réponses pour
les études 2024

Déjeuner
Q&R

21 novembre

Séances de
questions/réponses pour
les études 2024

Rencontre
partenaire

22 novembre

Je Décarbhone |
Rencontres nationales
de la décarbonation

Déjeuner
Q&R

23 novembre

Séances de
questions/réponses pour
les études 2024

Réunion des
adhérents
ALLICE

30 novembre

Club PRIME
Réunion plénière
Vote des sujets 2024

Rencontre
partenaire

28-30 novembre

ENLIT Europe

Webinaire
adhérents

7 décembre

Solutions contre
l'encrassement des
échangeurs

Rencontre
partenaire

8 décembre

Rencontre Ecotech
Innovation Energie
du PEXE

Journée
technique

12 décembre

Energy Class Factory
Lyon
(masterclass)

MERCI À TOUS !

*Rendez-vous au Club Prime le 30
novembre !*

