

# Effacité énergétique dans l'industrie

## Cogénération et trigénération pour applications industrielles: technologies

24-27 novembre 2014, Tunis, Tunisie

 **renac**  
renewables academy

En coopération avec:



Soutenu par:



[www.renac.de](http://www.renac.de)

## Emploi du temps des deux prochains jours

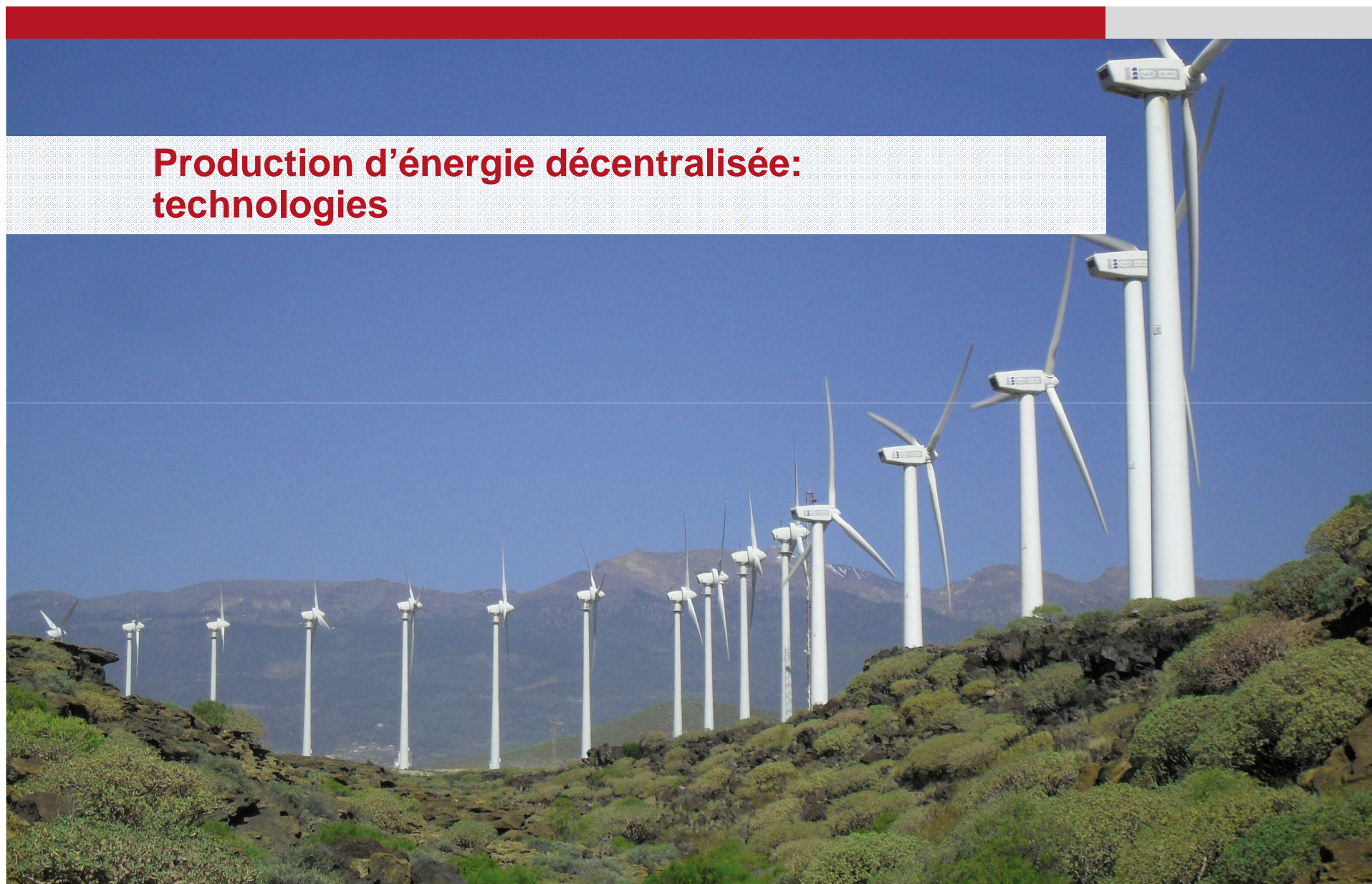
	Mercredi 26.11.2014	Jeudi 27.11.2014
9.00 - 10.30	09_Cogénération et trigénération pour applications industrielles: technologies	13_Concepts et évaluation économique
11.00 - 12.30	10_Cogénération et trigénération pour applications industrielles: dimensionnement et introduction à la pratique	14_Financement
13.30 - 15.00	11_Cogénération et trigénération pour applications industrielles: travaux pratiques	15_Approvisionnement et sous-traitance d'efficacité énergétique
15.30 - 17.00	12_Cogénération et trigénération pour applications industrielles: exemples de meilleure pratique	16_Efficacité énergétique dans les procédés industriels: présentation de résultats d'exercice, plan d'action des étapes à suivre, retours/commentaires, conclusion

## À propos du tuteur

- Frank Schillig est co-fondateur et Directeur Général de KWA Eviva, une entreprise de conseil et de développement de projet en énergies renouvelables basée en Allemagne depuis fin 2009. Il a acquis plus de dix-sept ans d'expériences en technologies d'énergies renouvelables.
- Jusqu'en 2009, Frank Schillig a travaillé comme International Business Development Manager pour la bioénergie et les projets énergétiques de grande envergure. Depuis 2000, il travaille pour Ecofys Allemagne en qualité de Senior Consultant et Responsable de Projet Internationalisation Bioénergie. Il a dirigé des projets sur les thèmes de la cogénération (ou production combinée de chaleur et d'électricité), de la conversion de biomasse en énergie, des techniques des énergies solaire et éolienne, parmi lesquels, le développement de tels projets et leurs risques possibles, des études pour les responsables politiques, des services de consultation stratégiques pour les acteurs du marché, des études de faisabilité et des missions de due diligence pour des promoteurs de projets et les banques. Son savoir-faire couvre tant les aspects des technologies, de l'économie, des questions environnementales que les conditions limites/limitrophes telles que la politique économique, le cadre juridique, les permis et autorisations. Il a publié nombreux articles dans le domaine de la bioénergie, a été promu Président des conférences sur la bioénergie, et est co-auteur d'un guide en bioénergie publié dans six pays européens.



## Production d'énergie décentralisée: technologies



## Contenu

- Aperçu des technologies
- De l'idée au concept (combustible, site, conception, aspects économiques)
- Bilan énergétique - conception du système
- Analyse économique de la production d'énergie décentralisée
- Exemple de bonnes pratiques

## Objectifs

- Comprendre les principes de co- et tri-génération
- Apprendre à définir l'unité de mesure d'une unité de cogénération
- Considérer les principales caractéristiques des unités de cogénération (CHP) et leurs influences sur le fonctionnement
- Comprendre les paramètres économiques de la production d'énergie décentralisée
- Avoir conscience des risques techniques d'un projet de cogénération

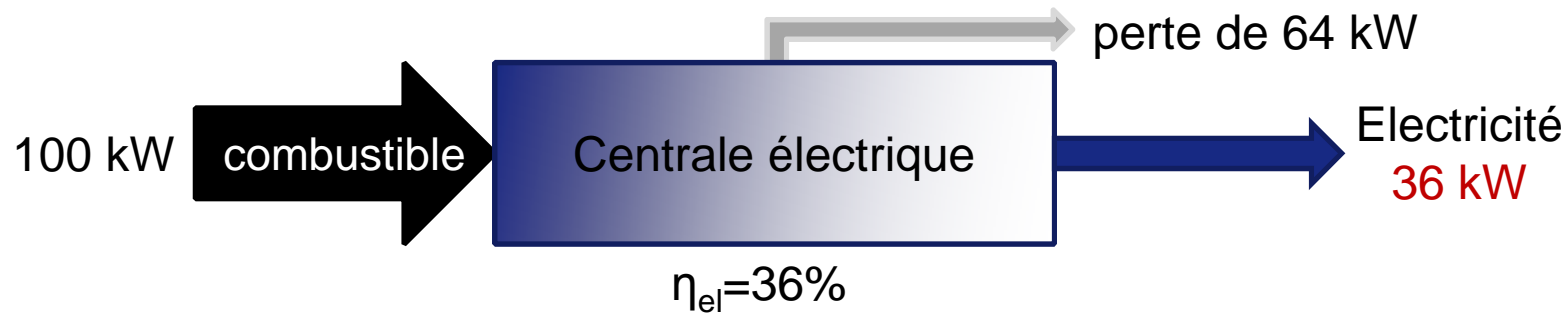
## Systeme énergétique décentralisée : principes fondamentaux

## Cogénération : définition

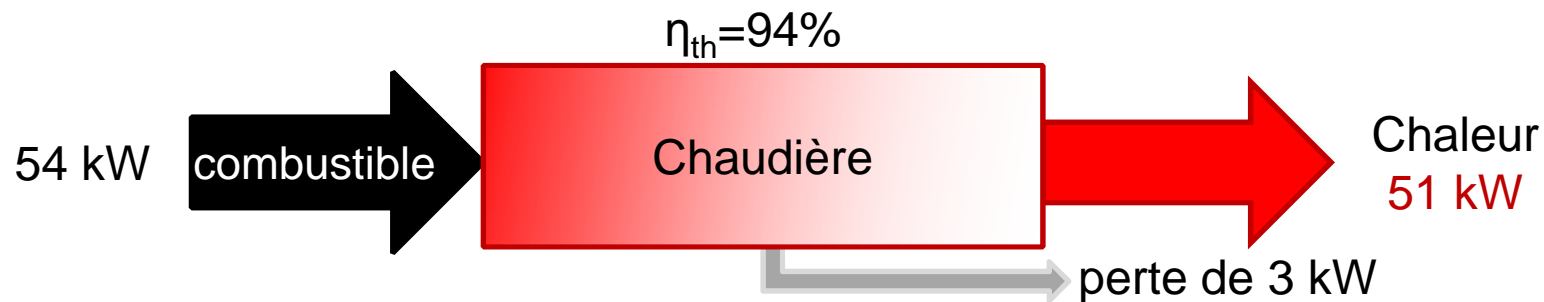
- **Cogénération** ou production combinée de chaleur et d'électricité (**CHP**)  
=  
production simultanée d'électricité et de chaleur exploitable dans un processus unique (à partir du même combustible)
  
- **Trigénération** ou production combinée de chaleur, d'électricité et de froid (**CCHP**)  
=  
production simultanée d'électricité, de chaleur et de froid exploitables dans un processus unique



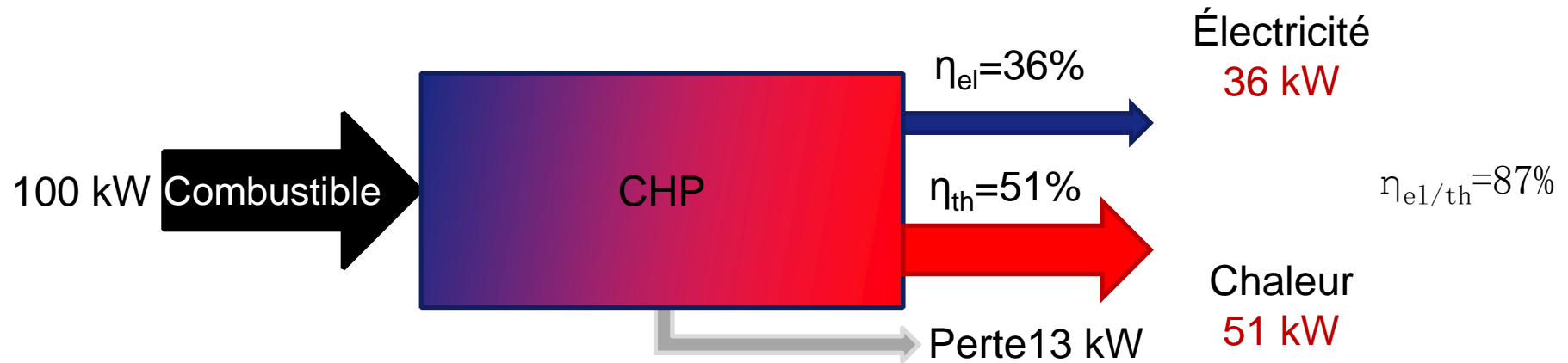
# Introduction - Production séparée d'électricité et de chaleur



$$\eta_{el/th}=56\%$$



# Cogénération d'électricité et de chaleur



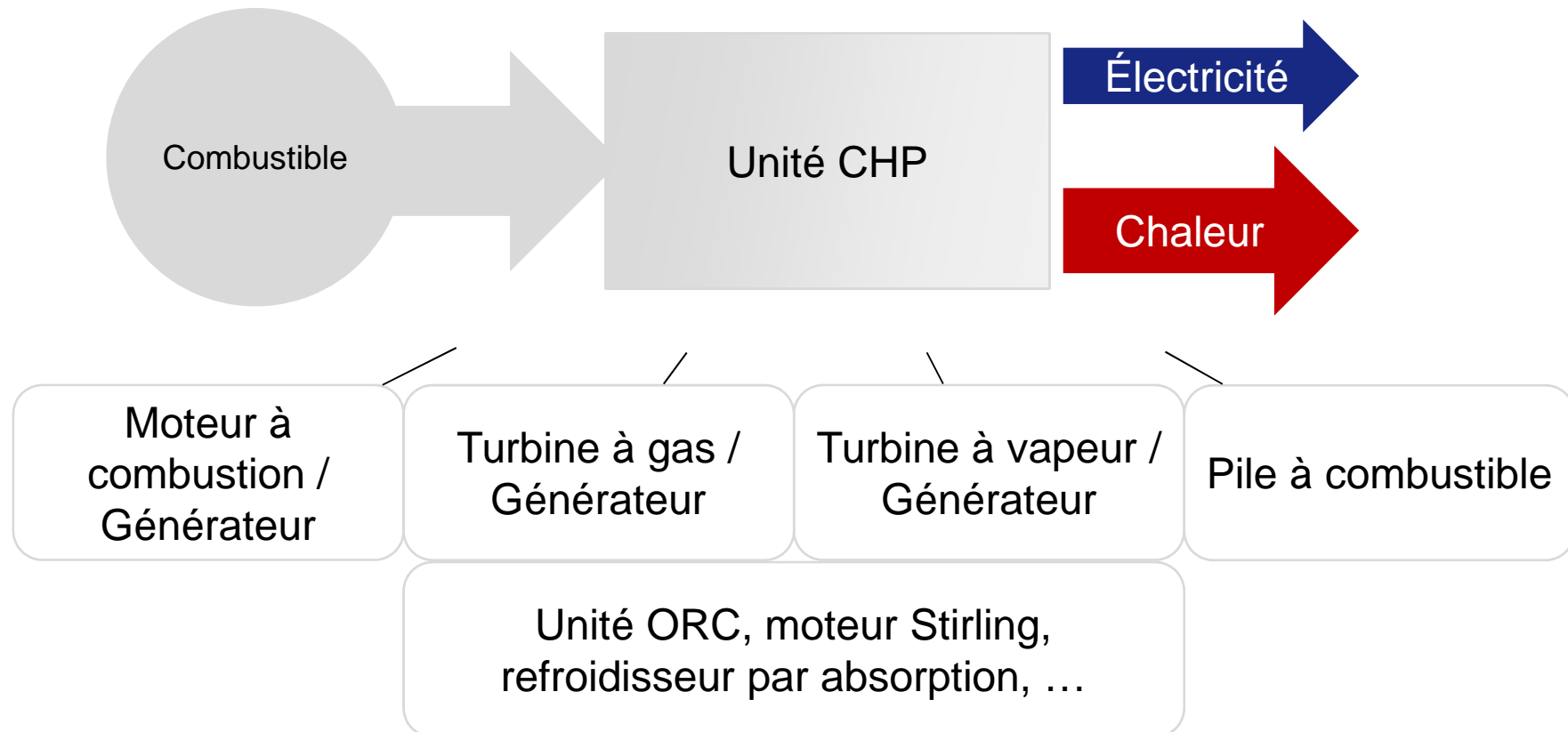
## Les inconvénients de la co/tri-génération

- Meilleure efficacité énergétique → consommation d'énergie primaire réduite
- Émission réduite de CO<sub>2</sub>
- Plus économique
- Dépendance mineure à l'égard des prix de l'énergie

## Les inconvénients de la co/tri-génération

- Les besoins et la production de chaleur doivent s'accorder
- Savoir-faire → adapté à la demande d'énergie
- Coûts en capital plus élevés
- Efforts de maintenance plus élevés

# Principe de la cogénération



## Principales applications de la cogénération

- Tableau récapitulatif des principales applications de la cogénération:

Caracteristiques	Type 1	Type 2	Type 3	Type 4	Type 5
Puissance de l'équipement	>100 MW	10-100 MW	<20 MW	<5 MW	<100 kW
Utilisation de la production électrique par l'hôte	Mineure	Mixte	Majeure	Majeure	Majeure
Utilisation principale de la puissance thermique par l'hôte	Majeur/Mixe	Majeur/Mixe	Majeur	Tous	Tous
Propriété de l'équipement	Tiers	Tiers /Personnelle	Personnelle / Tiers	Personnelle / Tiers	Personnelle

- Un projet de cogénération peut être évalué selon deux critères différents:
  1. Efficacité
  2. Facilité et faisabilité

## Folie 14

---

f1

was heisst convenience?  
source kann auch weg.  
fsc; 29.07.2013

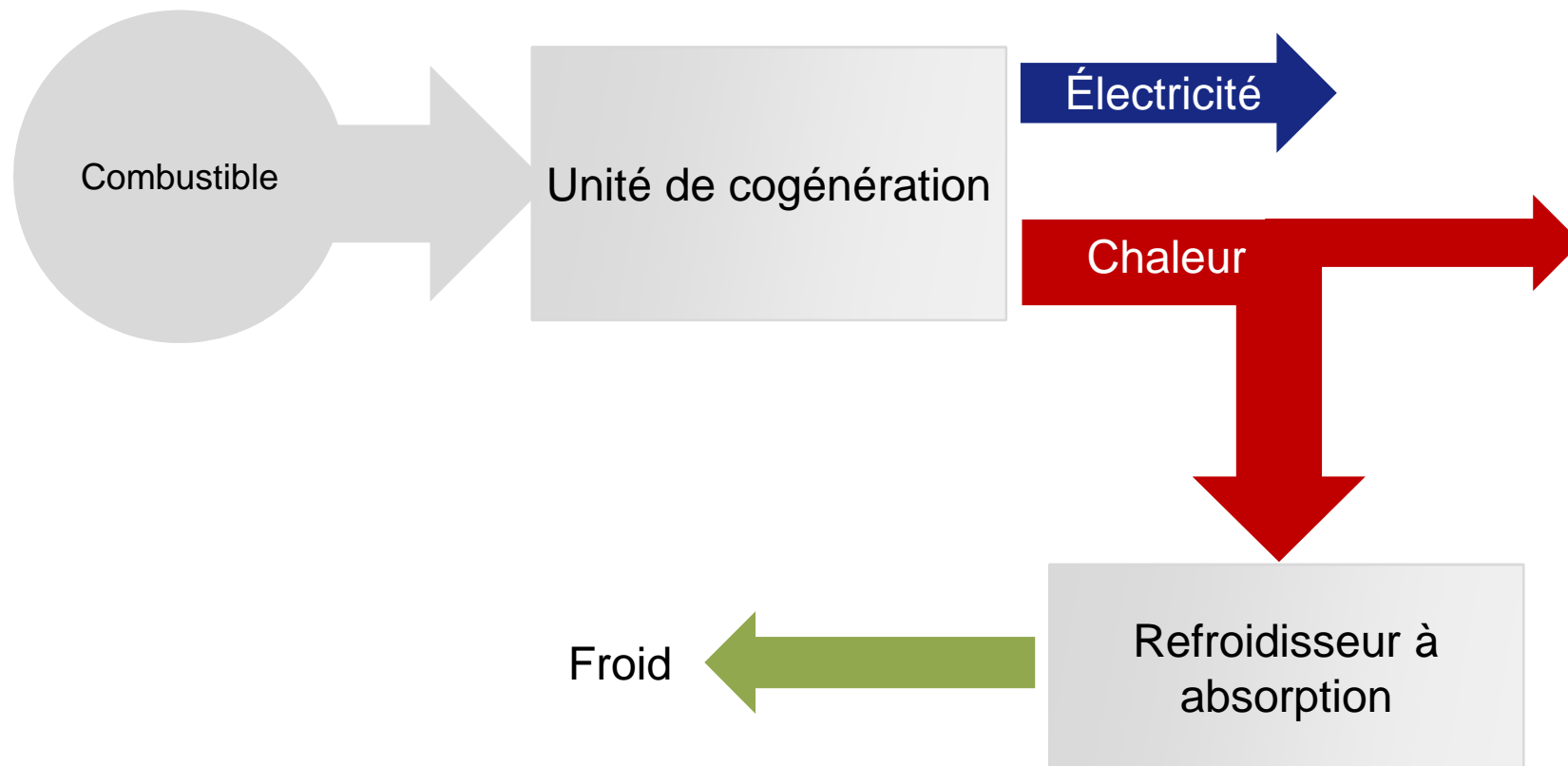
# Cogénération: définitions de l'efficacité

Efficacité électrique	$\eta_e = \frac{P_e}{\Phi_{in}}$
Efficacité thermique	$\eta_t = \frac{\Phi_u}{\Phi_{in}}$
Indice de production électrique	$I_e = \frac{P_e}{\Phi_u} = \frac{\eta_e}{\eta_u}$
Principe d'efficacité de la première loi de thermodynamique	$\eta_I = \frac{P_e + \Phi_u}{\Phi_{in}}$
Principe d'efficacité de la seconde loi de thermodynamique	$\eta_{II} = \frac{P_e + \Phi_u \cdot \left(1 - \frac{T_0}{T_x}\right)}{\Phi_{in}}$

$P_e$  = Puissance électrique    ,  $\Phi_{in}$  = Combustible     $\Phi_u$  = Puissance thermique  
 $T_0$  = Température de référence     $T_x$  = Température nécessité par l'utilisateur

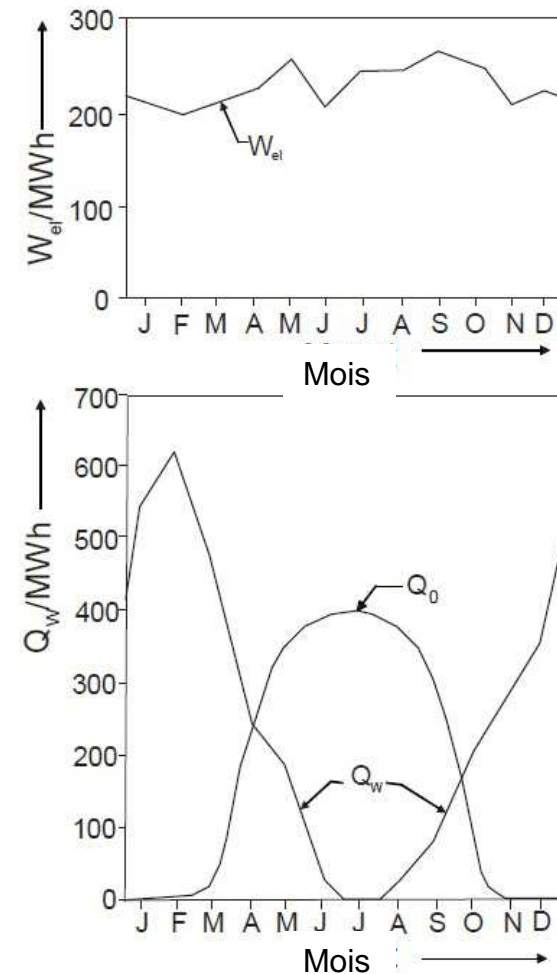


# Principe de production combinée de chaleur, d'électricité et de froid

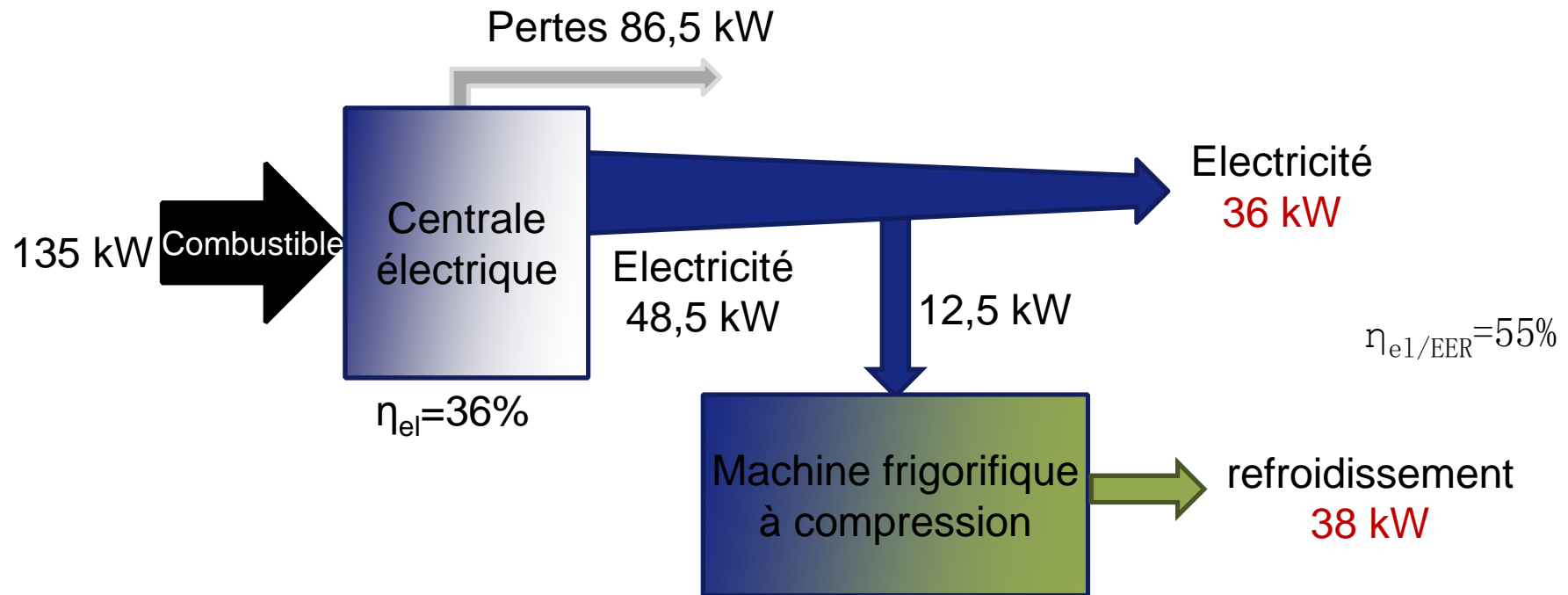


## Atouts de l'utilisation de la trigénération

- Exemple: schéma de la consommation d'un hôpital
- Consommation constante d'énergie
- Faible consommation de chaleur en été
- Mais : consommation élevée d'eau de refroidissement en été
- Solution optimale : utiliser la chaleur produite par le CHP pour la production de froid
  - réduire les couts
  - économiser l'énergie primaire

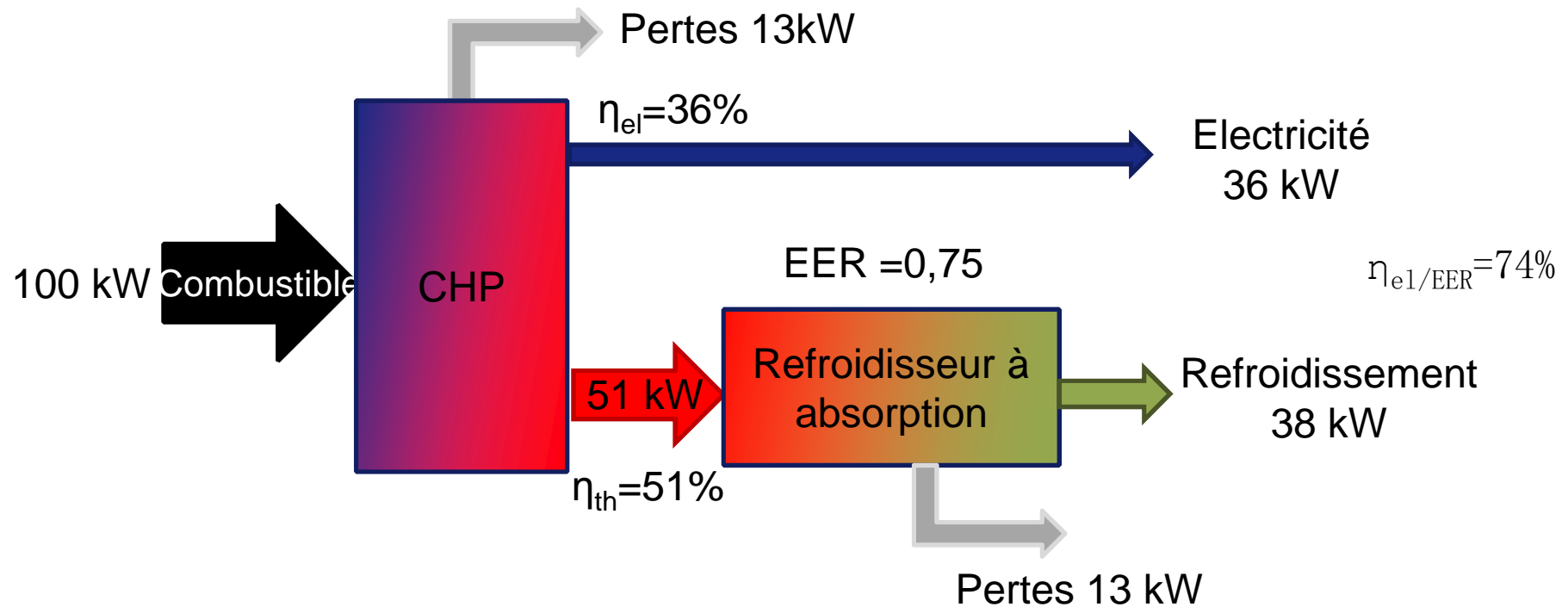


# Production séparée d'électricité et de froid



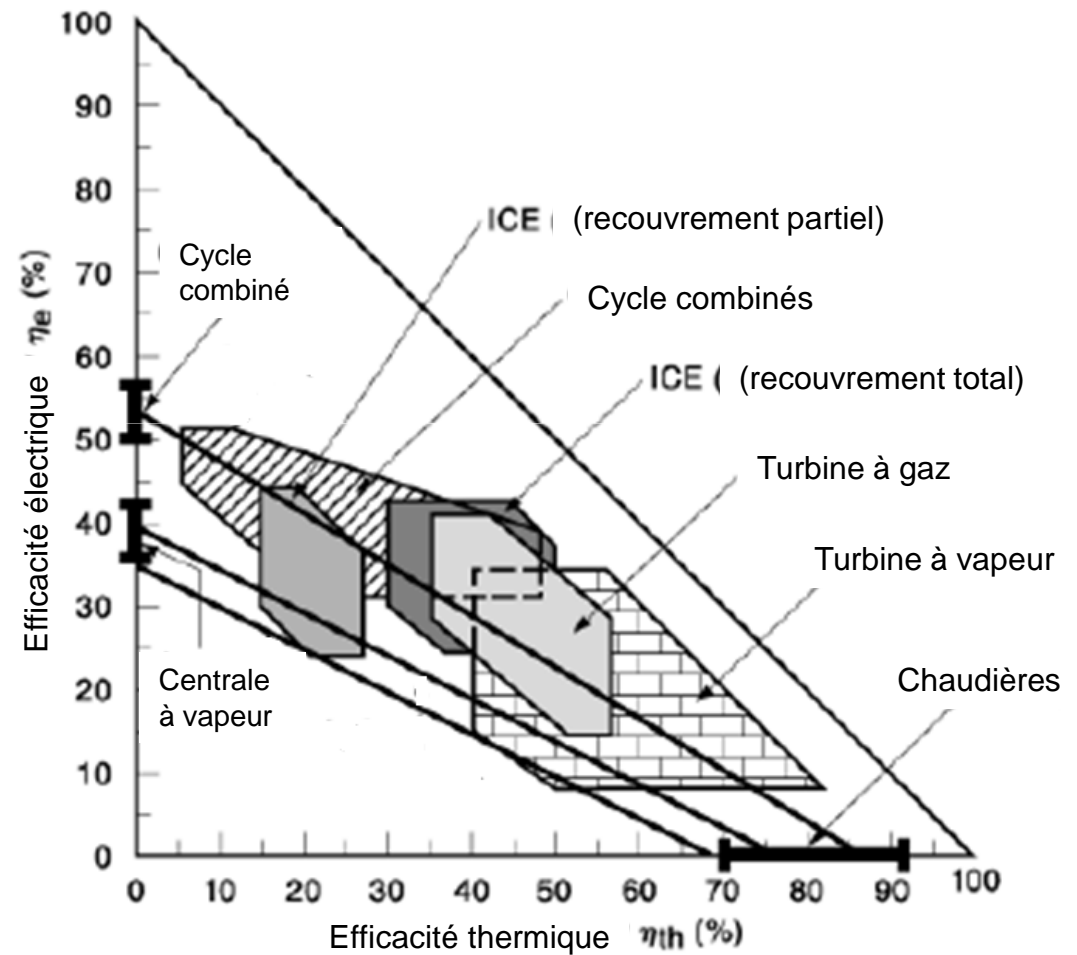
Ratio d'efficacité énergétique (**EER**) =3

# Production combinée de froid, de chaleur et d'électricité



- Ratio d'économie d'énergie du combustible

$$I_e = \frac{P_e}{\Phi_u} = \frac{\eta_e}{\eta_u}$$

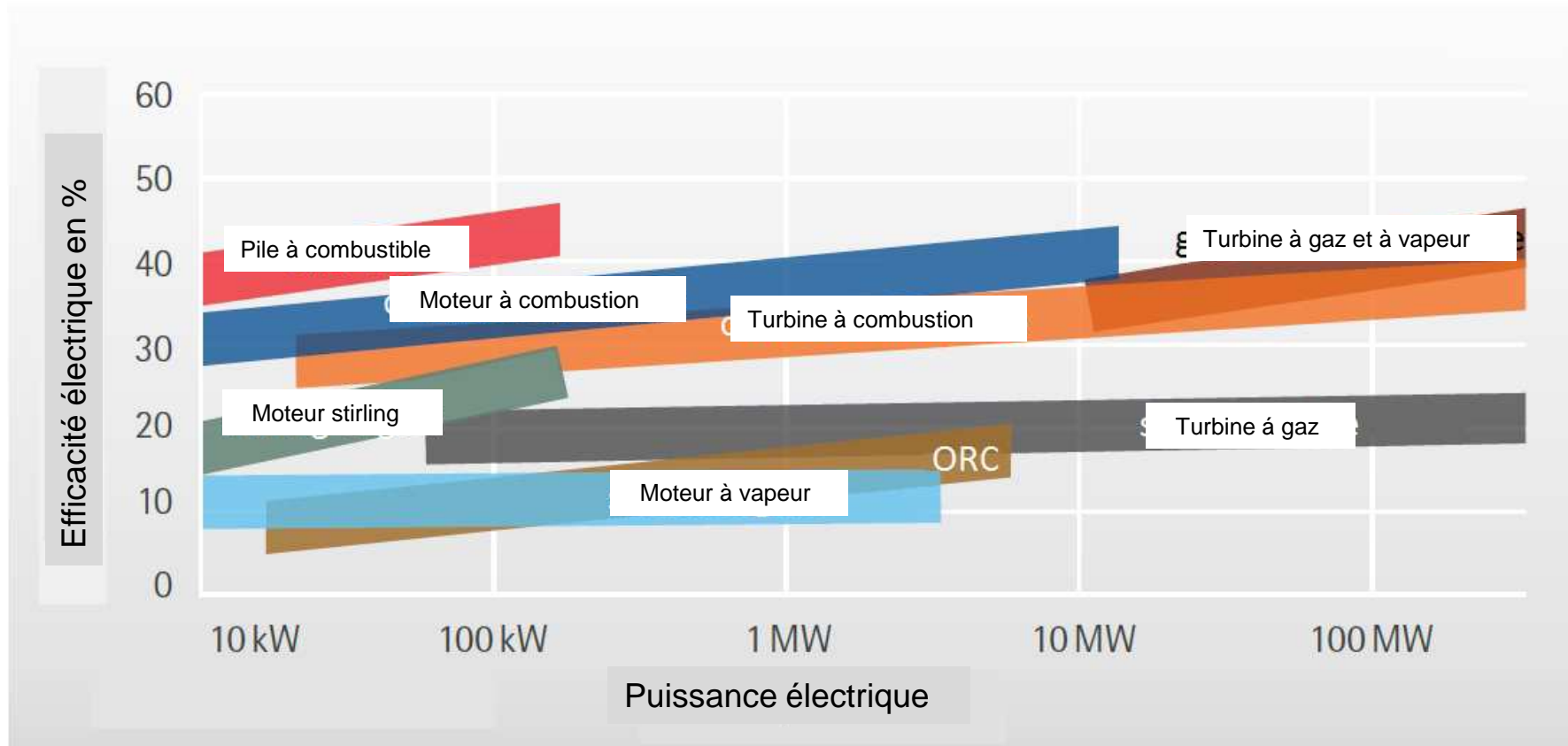


Source: J. Webster (ed.), Wiley Encyclopedia of Electrical and Electronics Engineering, 1999, John Wiley & Sons, Inc.

## Production d'énergie décentralisée - technologies



# Téchnologies de cogénération industrielle



Source: Bundesverband Kraft-Wärme-Kopplung e.V.

# Technologies de cogénération

1. Moteur à combustion
  1. Unité de Cogénération
  2. Systèmes de micro-cogénération
2. Microturbine à gaz
3. Cycle de Rankine à fluide organique
4. Moteur Stirling
5. Cellules à combustible
6. Refroidisseur à absorption
7. Cuve de stockage à conversion thermique



# Moteur à combustion



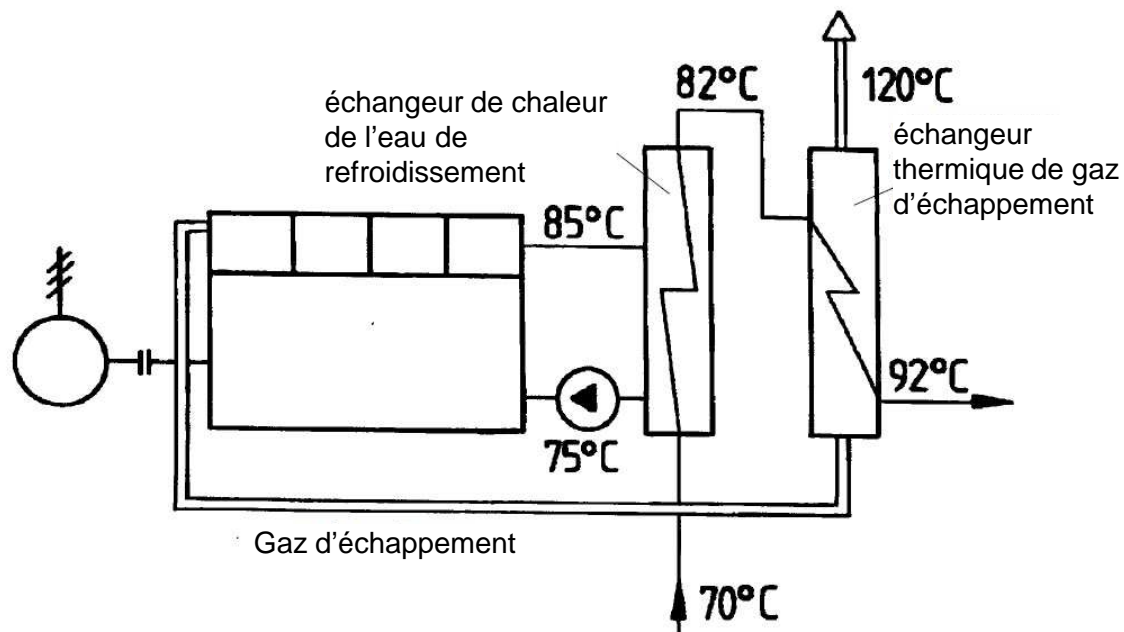
## Domaines typiques d'utilisation

- Dans l'industrie
  - Fabrication, transformation alimentaire, industrie du papier, brasserie, industrie chimique, etc.
- Production d'énergie décentralisée
- Piscine, centre de bien-être
- Hôpitaux et maison de soins et de repos
- Hôtels & Complexes
- Écoles et universités
- Immeuble à appartements, maisons individuelles
- Aéroport, centres commerciaux, bureaux

# Extraction de la chaleur des gaz d'échappement et des eaux de refroidissement pour cogénération

Énergie électrique	140 kW	2000 kW
Eaux de refroidissement	127 kW → 61%	1006 kW → 51%
Gaz d'échappement	80 kW → 39%	972 kW → 49%

Source: 2G Energy AG



Source: www.asue.de

## Extraction de chaleur d'une unité de cogénération

- Extraction de chaleur en une seule étape
- Extraction de la chaleur de l'eau de refroidissement et des gaz d'échappement en un cycle unique
- Extraction en deux étapes
- Extraction de la chaleur de l'eau de refroidissement et des gaz d'échappement en deux cycles séparés
- Haute température des gaz d'échappement utilisable, pour produire de la vapeur par exemple.

# Indicateurs de performance clés - moteur à combustion

	Moteur à allumage par étincelle (moteur à essence)	Moteur à allumage par compression (moteur diesel)
Puissance électrique	0,001-18 MW	0,005-20 MW
Efficacité global	80 - 95 %	80 - 95 %
Efficacité électrique	25 – 45 %	28 – 46 %
Coefficient de cogénération	0,4 – 1,3	0,5 – 1,3
Température	Jusqu'à 130 °C	Jusqu'à 130 °C
Comportement à charge partielle	Bien	Bien

Source: Bundesverband Kraft-Wärme-Kopplung e.V.

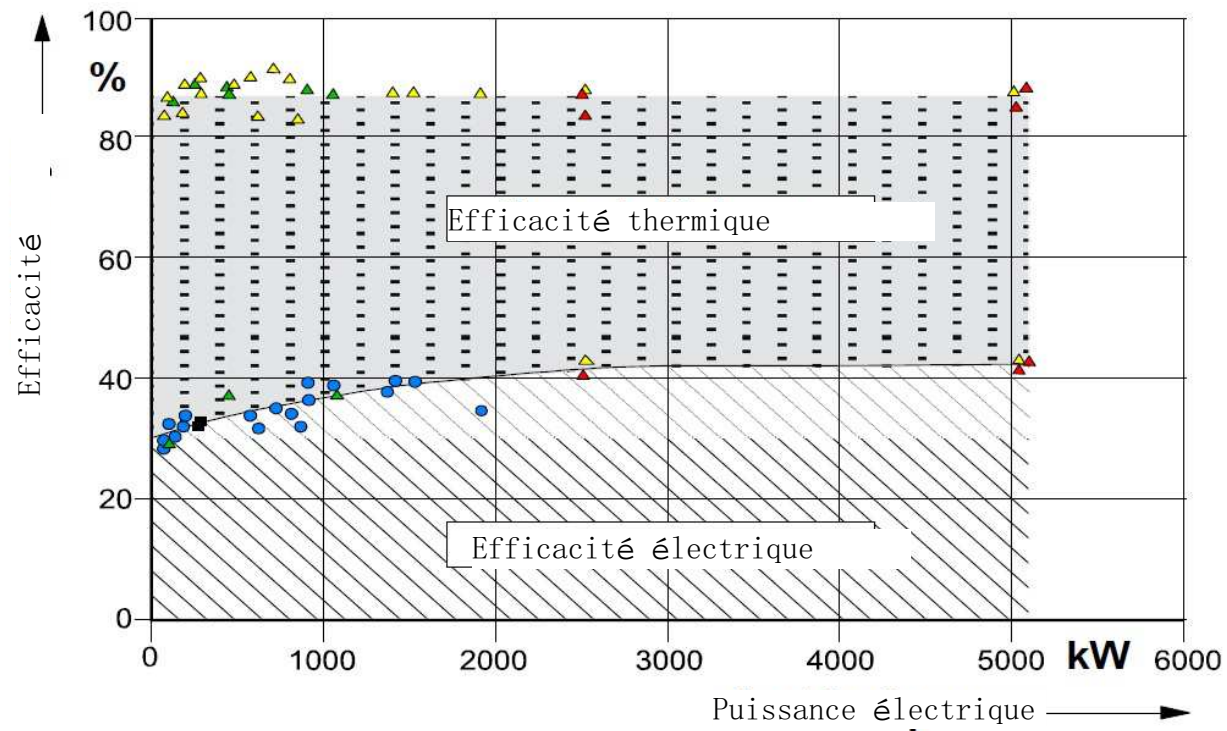
## Spécifications techniques - 2G Energy AG

- Technique de pointe :
  - disponible sur le marché depuis 1995
  - Plus de 3000 unités vendues

Unité	Puissance électrique	Puissance thermique	Efficacité électrique	Efficacité thermique	Efficacité globale	Combustible
2G KWK 140 EG	140 kW	207 kW (100°C)	36,5 %	53,9 %	90,5%	Gaz naturel
agenitor 406	250 kW	268 kW (120°C)	42,5 %	45,5 %	88,1%	Gaz naturel
avus 2000c	2000 kW	1990 kW (120°C)	43,6 %	43,4 %	87%	Gaz naturel

Source: [www.2-g.de](http://www.2-g.de)

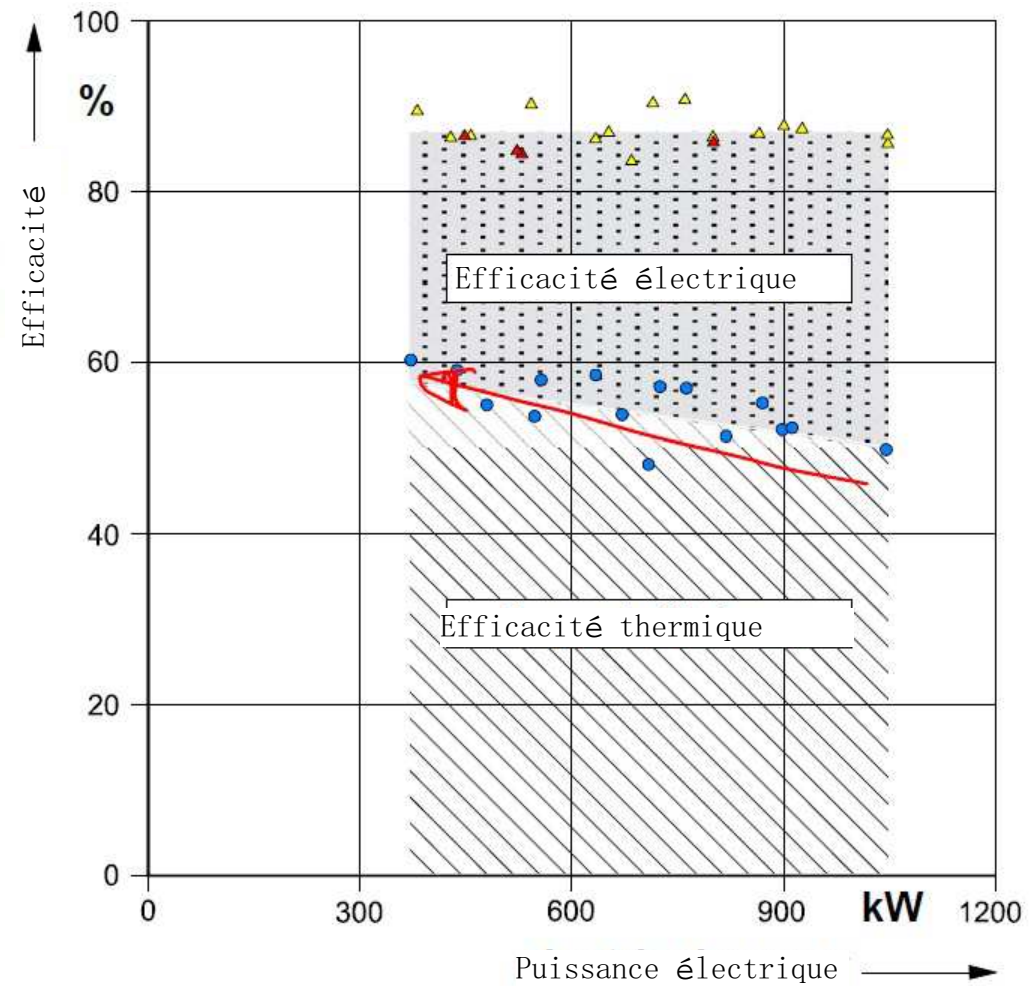
# Efficacité à pleine charge



Source: LTT – RWTH Aachen

# Efficacité à charge partielle

- Catégorie de performance : puissance électrique de 1000 kW
- Efficacité électrique est réduite lors du fonctionnement en charge partielle
- Efficacité globale est quasi constante



Source: LTT – RWTH Aachen



## Caractéristiques des système de micro-cogénération

- Puissance électrique de moins de 50 kWel
- Applications
  - Cogénération intégrée aux bâtiments
    - Complexe résidentiel
    - Maison individuelle
- Commerce et industrie
- Piscine et centres de bien-être
- Hôtels
- Technique de pointe: disponible sur le marché, lancement sur le marche en 2007

# Systemes de micro-cogeneration Specificites techniques – EC Power GmbH

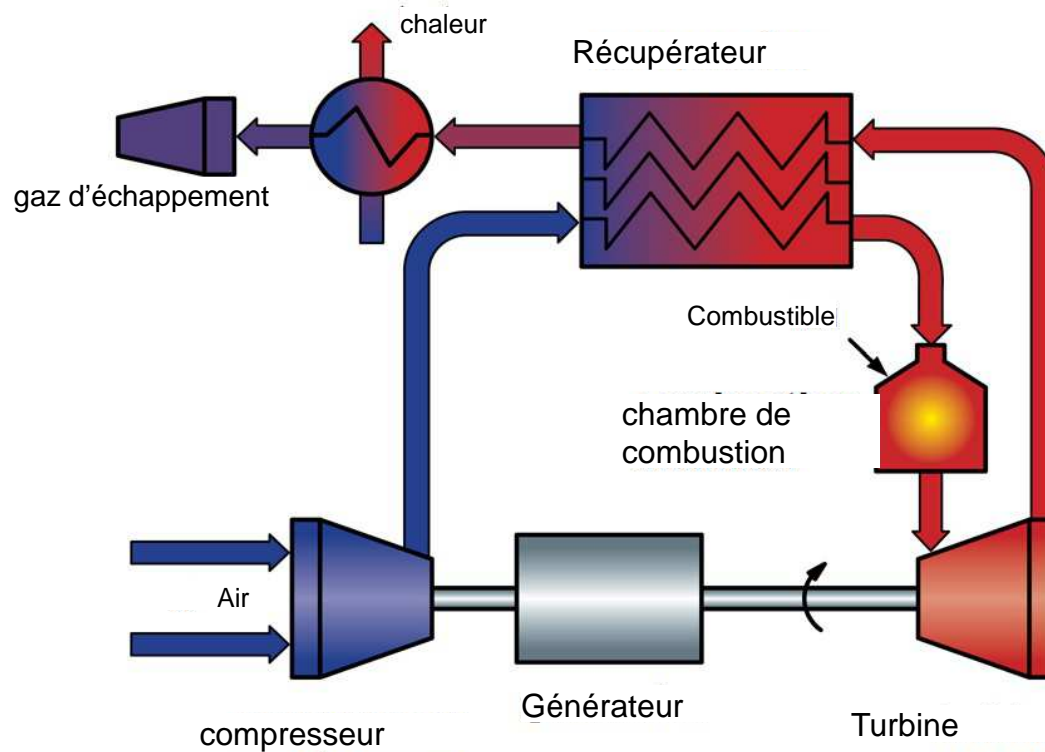
Unité	Puissance électrique	Puissance thermique	Efficacité électrique	Efficacité thermique	Efficacité globale	Température utilisable
XRGI 6	2,5-6 kW	8-13,5 kW	28 %	64%	92%	80-85°C
XRGI 9	4-9 kW	14-20 kW	29 %	65 %	94%	80-85°C
XRGI 15	6-15 kW	17-30 kW	30 %	62 %	92%	80-85°C
XRGI 20	10-20 kW	25-40 kW	32 %	64 %	96%	80-85°C

# Microturbine à gaz



Source [www.microturbine.de](http://www.microturbine.de)

# Microturbine à gaz – principes de fonctionnement



Source: [www.enertwin.com](http://www.enertwin.com)

# Microturbine à gaz

## Caractéristiques techniques – exemple: Capstone

Technique de pointe :

- ✦ disponible sur le marché
- ✦ lancement sur le marché en 2000

Unité	Puissance électrique	Puissance thermique HX	Efficacité électrique	Efficacité globale	Température des gaz d'échappement	Puissance des gaz d'échappement
C30	30kW	68kW	24%	83%	275°C	80 kW
C50	50kW	110kW	26%	83%	294°C	140 kW
C200	200kW	290kW	31%	79%	280°C	395 kW
C600	600kW	858kW	33%	80%	275°C	1170 kW
C1000	1000kW	1430kW	33%	80%	275°C	1950 kW

Source [www.microturbine.de](http://www.microturbine.de)

## Microturbine à gaz - Avantages/Inconvénients

- **Avantages**
  - Différents types de combustibles utilisables
    - gaz naturel , GPL, gaz d'égouts, kérosène, mazout
  - Température plus élevée des gaz d'échappement
  - faible poids et conception compact
  - faible émission sonore
  - faible émission de gaz d'échappement
- **Inconvénients** (en comparaison aux moteurs à combustion)
  - Coût d'investissement plus élevé
  - Efficacité électrique réduite
  - Performance en charge partielle plus basse

## Cycle de Rankine à fluide organique (ORC)

- Principe de fonctionnement identique au cycle Rankine (turbine à vapeur)
- Utilisation d'un fluide organique à masse moléculaire élevée
- Température d'ébullition inférieure à l'interface de passage eau-vapeur
- Permet une récupération de chaleur de sources de température plus basse telles que la combustion de biomasse, la chaleur produite par les déchets industriels, la chaleur géothermique
- Chaleur à basse température convertie en électricité

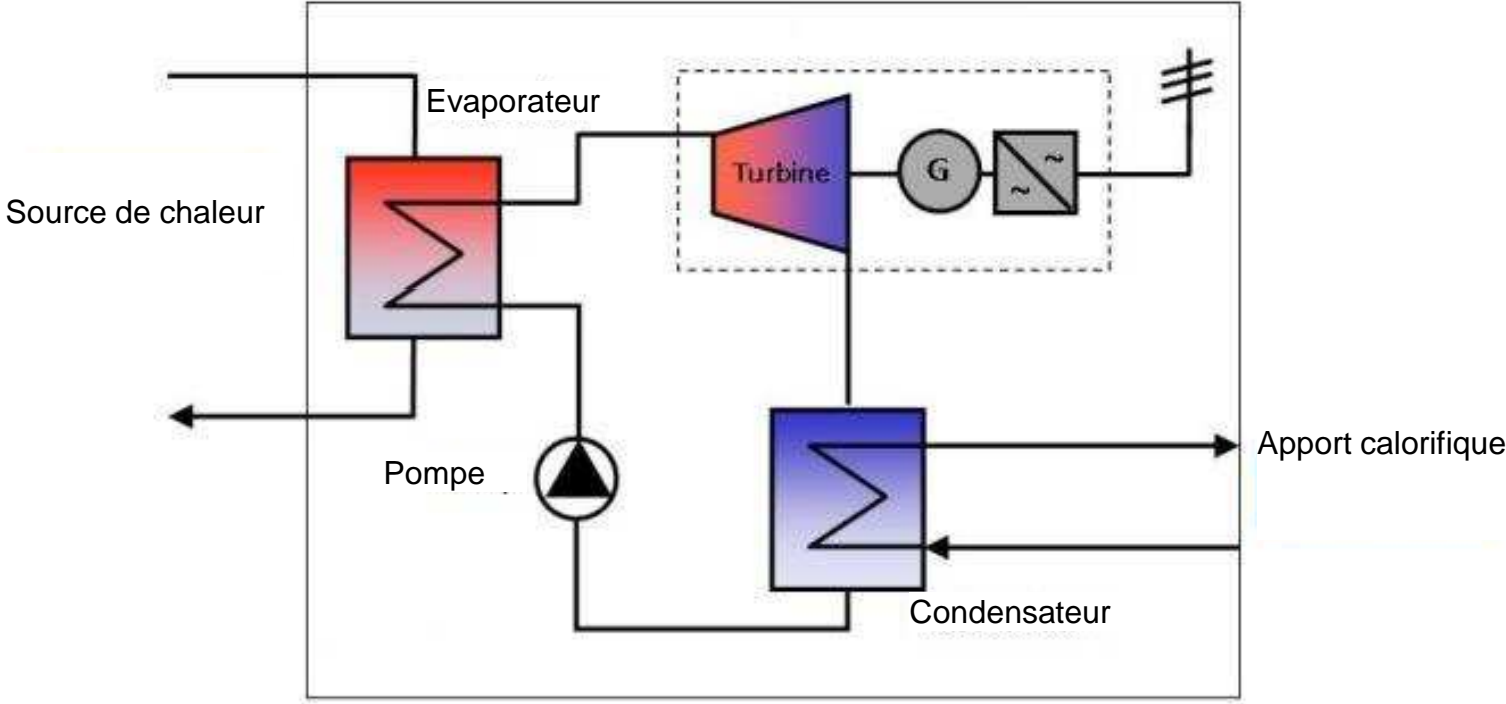
De grandes unités ORC (500-2000 kW) sont établies sur le marché

De plus petites unités (40-60 kW) sont à l'essai depuis 3 ans



Source: Dürr Cyplan Ltd.

# Principe de fonctionnement du cycle de Rankine à fluide organique





## Caractéristiques techniques des ORC

Puissance électrique	0,02 – 5 MW
Efficacité globale	jusqu'à 80 %
Efficacité électrique	6 – 20 %
Coefficient CHP	0,1 – 0,3
Température (demande de chaleur)	85 to 300 °C

Source de chaleur / chaleur résiduelle d'échappement	Puissance électrique	Efficacité électrique	Température utilisable
Basse température > 90-150 °C	70-500 kW	6-10%	30-40°C
Température élevée > 300 °C	70-500 kW	17-20%	60-90°C

Source: Dürr Cyplan

## ORC - Avantages/Inconvénients

- **Avantages**

- Grande fiabilité
- Capacité de charge partielle
- Peu d'entretien
- Fonctionnement silencieux

- **Inconvénients**

- Coûts d'investissement élevés
- Faible rendement électrique
- Besoin en électricité des propres sources énergétiques élevé
- Fluide organique souvent nocif pour l'environnement

# Refroidisseur par absorption - Chaleur → Froid



Source: [www.colibri-bv.com](http://www.colibri-bv.com)

# Refroidisseur par absorption – exemples d'indicateurs de performance clés

Gamme de performance	Réfrigérant/ solvent de nettoyage	Puissance de fonctionnement (source de chaleur)	Température de refroidissement
4,5-10 kW	H <sub>2</sub> O/LiBr	eau/vapeur 75-120°C	de 6°C à 7°C
15-11.630 kW		eau/vapeur 85-135°C	de 6°C à 10°C
5-18,4 kW	NH <sub>3</sub> /H <sub>2</sub> O	eau > 78°C	de -45°C à 3°C
100-10.000 kW		eau/vapeur 90-180°C	de -50°C à 2°C

# Merci!

## Frank Schillig

KWA Eviva GmbH – [www.eviva-energy.com](http://www.eviva-energy.com)  
f.schillig@eviva-energy.com – Tel: +49 221 78946910  
pour le compte de:

## Renewables Academy (RENAC)

Schönhauser Allee 10-11  
D-10119 Berlin  
Tel: +49 30 52 689 58-71  
Fax: +49 30 52 689 58-99  
[info@renac.de](mailto:info@renac.de)



**renac**  
renewables academy

En coopération avec:



Soutenu par:



[www.renac.de](http://www.renac.de)