



# Production simultanée de chaleur, d'électricité et de froid pour l'habitat. Quelles solutions technologiques ?

François Lanzetta

Directeur du département ENERGIE de l'institut FEMTO-ST  
Professeur à l'Université de Franche-Comté

[www.femto-st.fr](http://www.femto-st.fr)



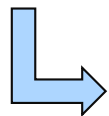
3<sup>ème</sup> matinée  
Habitat et transition énergétique

## Appels à projets

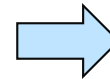
### 1) Appel à Manifestation d'Intérêt

#### ◆ Territoire d'Innovation de Grande Ambition (TIGA)

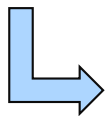
Pays de Montbéliard Agglomération, Grand Belfort Communauté d'Agglomération  
PSA Groupe, General Electric, Alstom,  
UTBM, UFC  
FCLAB (FR CNRS 3539) et FEMTO-ST (UMR CNRS 6174)



« **Création d'un écosystème  
d'innovation et développement  
de green technologies** »



**Améliorer la qualité  
de vie des habitants  
et augmenter la  
durabilité du territoire**



Industrie 4.0

Vecteur Hydrogène: transport **et HABITAT**

## 2) Projet ECOCAMPUS

### ◆ Projet structurel et « **bâtimentaire** »

- Structurer l'enseignement en sciences de l'énergie (UBFC + UTBM) sur un même site
- Construire un nouveau bâtiment pour la recherche
- Plateaux pédagogiques
- **Recherche d'excellence sur la transition énergétique**



# Transition Energétique pour la Croissance Verte

## ÉMISSIONS DE GES



Réduire les émissions de Gaz à Effet de Serre

**- 40%** Entre 1990 et 2030    **÷4** Entre 1990 et 2050

## ÉNERGIES FOSSILES



Réduire la consommation énergétique primaire des énergies fossiles

**- 30%** Entre 2012 et 2030

## ÉNERGIE FINALE



Réduire la consommation énergétique finale

**- 20%** Entre 2012 et 2030    **-50%** Entre 2012 et 2050

## ÉNERGIES VERTES



Augmenter la part des énergies renouvelables dans la consommation finale brute d'énergie

**+23%** En 2020    **+32%** En 2030

## PARC IMMOBILIER



Rénover l'ensemble du parc immobilier privé

**BBC** d'ici 2050



2016

**64 millions** de Français

**56 % d'habitants**  
en maison individuelle

**297 500 logements**  
construits par an

**288 000 rénovations\***  
de logements par an

**190 kWh/m<sup>2</sup>/an**  
de consommation\*\*\*  
moyenne par logement

\* rénovations performantes de logements.

\*\* norme BBC.

\*\*\* en énergie finale et sur tous les usages.

Sources : Visions Energie-Climat 2030-2050 de l'ADEME (2013), Chiffres-clés Air Energie Climat de l'ADEME (2014), INSEE (2014), SOeS (2012 et 2015).

2050

**72,3 millions** de Français

**60 % d'habitants**  
en logements collectifs

**300 000 logements**  
construits par an

**Tous les bâtiments existants**  
devront être rénovés\*\*

**75 kWh/m<sup>2</sup>/an**  
de consommation  
moyenne par logement

**÷ 2.5**



# En approche Carbone, objectifs de la LTE atteints si :



## 2030

- 54 % émissions CO2 des énergies fossiles

Généralisation de la condensation

10 % de biométhane dans réseau gaz

## 2050

- 87 % émissions CO2 des énergies fossiles

Parc au niveau BBC Rénovation

40 % de biométhane dans réseau gaz

Principales hypothèses :

- jusqu'à 2030 ; pas de modifications majeures dans transferts entre énergies
- 2030/2050 : rénovation fioul (1/3 gaz ; 1/3 bois ; 1/3 élec) – rénovation gaz (70% gaz ; 15% RCU ; 15% élec)
- Si LTE mobilité est appliquée.



## Scénario actuel (majoritaire) : 2020

➔ Systèmes de « génération » d'énergie indépendants



© Julien Corvezet

# Scénario actuel (majoritaire)

➔ Systèmes de « génération » d'énergie indépendants

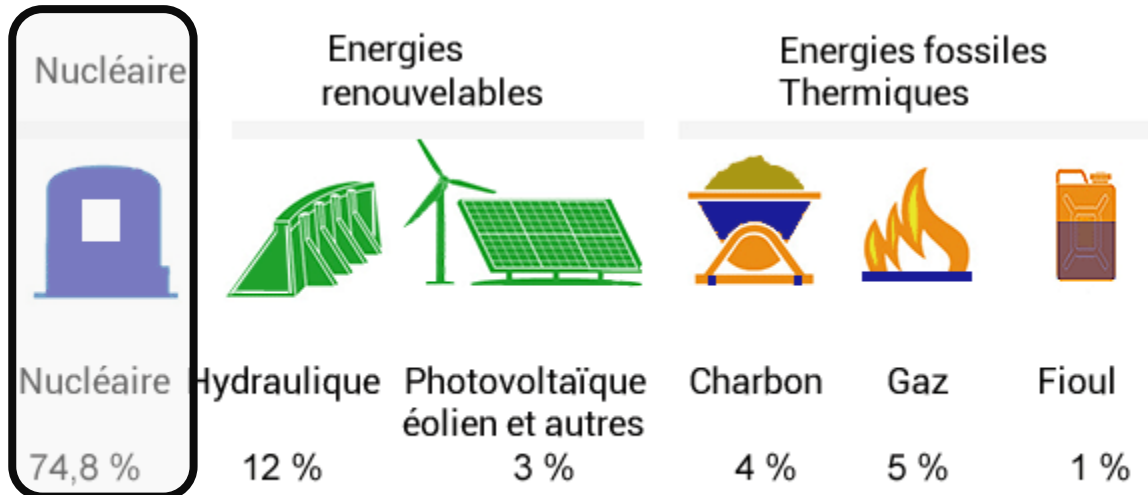
## Chauffage



Référence = chaudière à gaz à condensation



## Electricité



Source données Eurostat 2014

www.picbleu.fr reproduction interdite sans autorisation



## Froid

Climatiseurs individuels

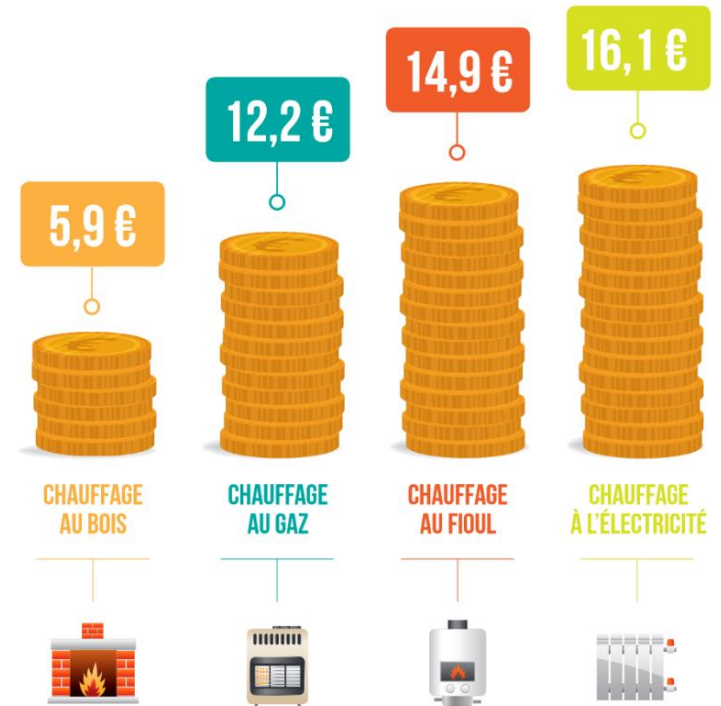




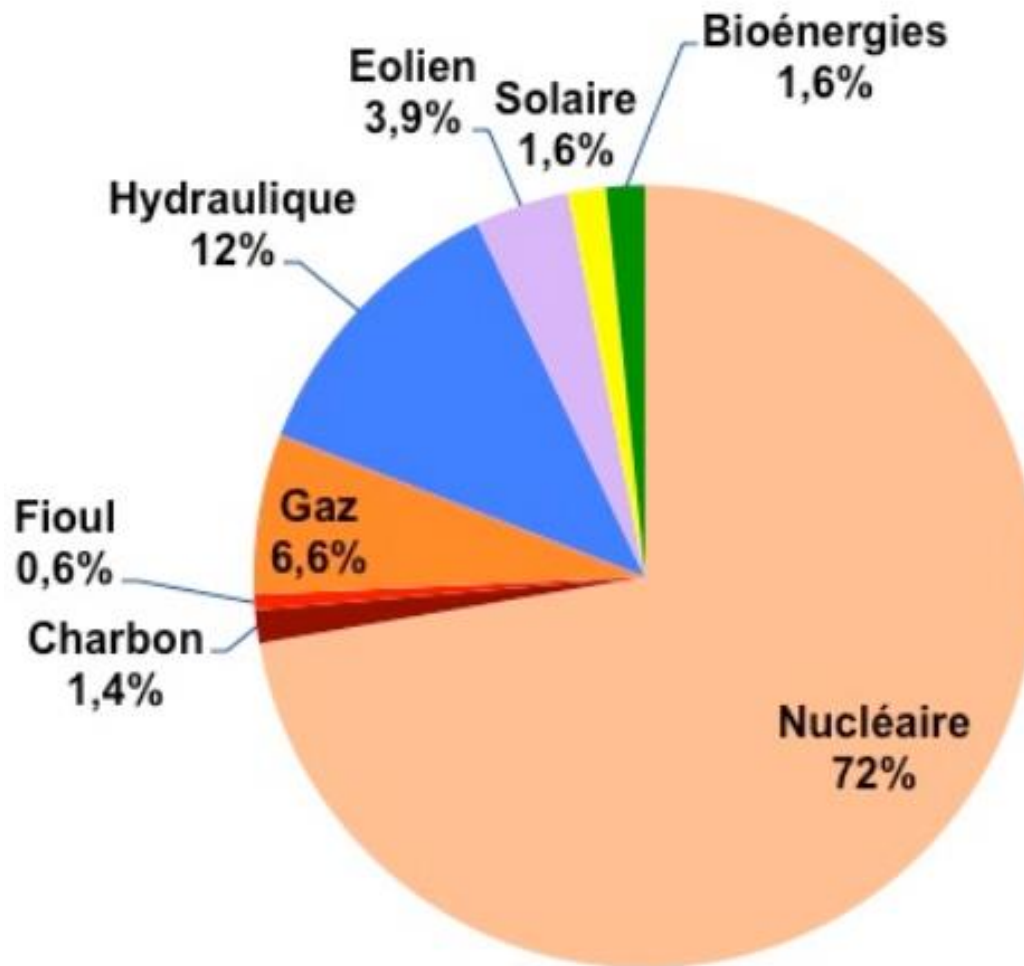
# 1) Chauffage



Chauffer 1 m<sup>2</sup>/an



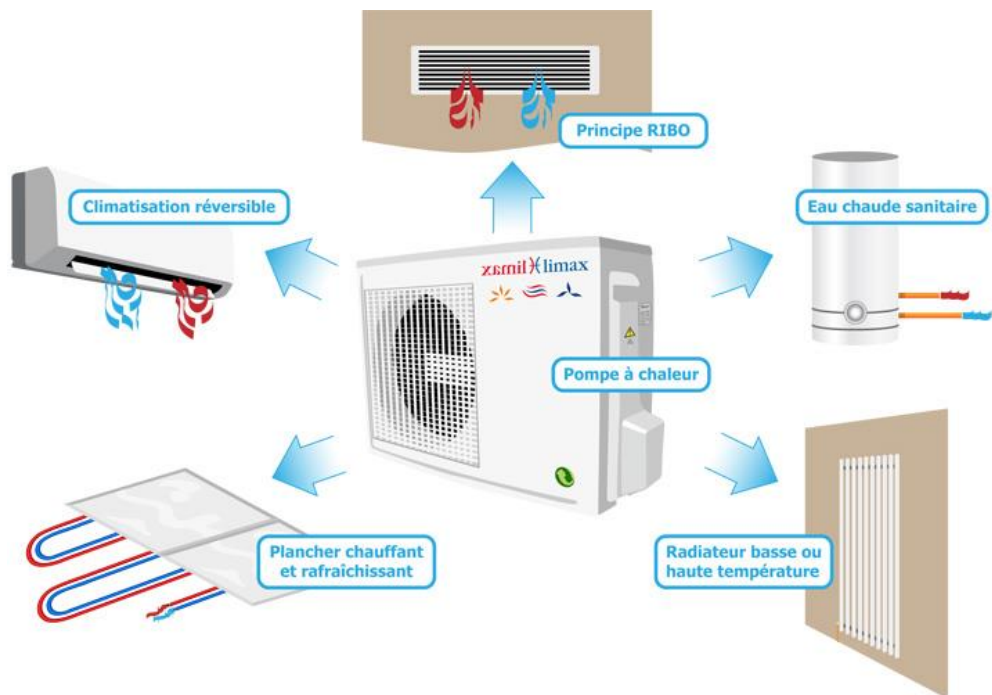
## 2) Electricité



*Décomposition de la production électrique en France en 2016.  
L'ensemble représente 531 TWh  
(1 TWh = 1 milliard de kWh).  
Source : RTE.*

### 3) Froid

## Rafrâichissement et Climatisation

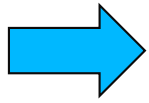


## Scénario futur : 2020 - 2050

➔ Systèmes de « poly-génération » d'énergie simultanés + MIX EnR



## Challenge pour l'habitat



Comment produire simultanément  
de la chaleur, de l'électricité et du froid ?

Exemple de construction de 2 bâtiments d'habitation = 2 x 20 appartements  
Projet TIGA...

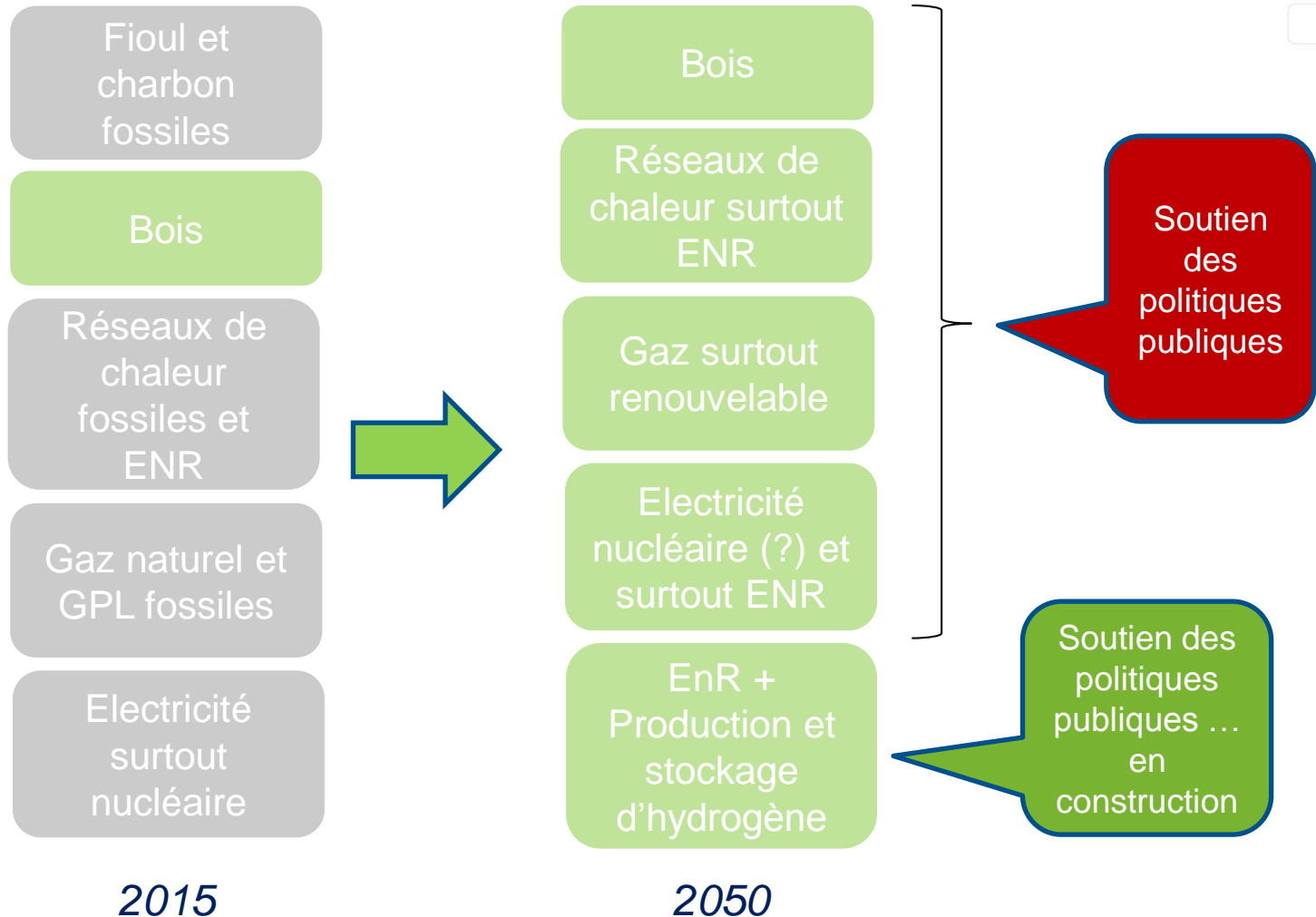
RT2012 50 kWhep/(m<sup>2</sup>.an)



RT2020 ? = RT2012 – 20% ?



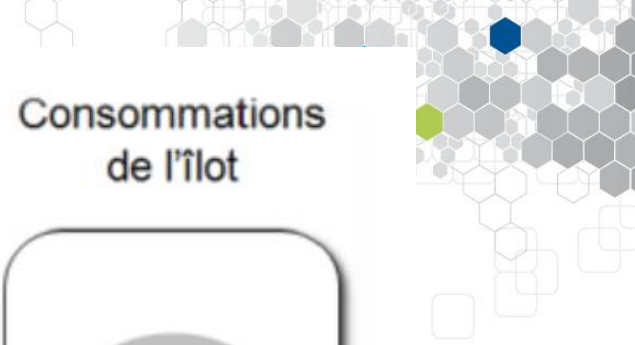
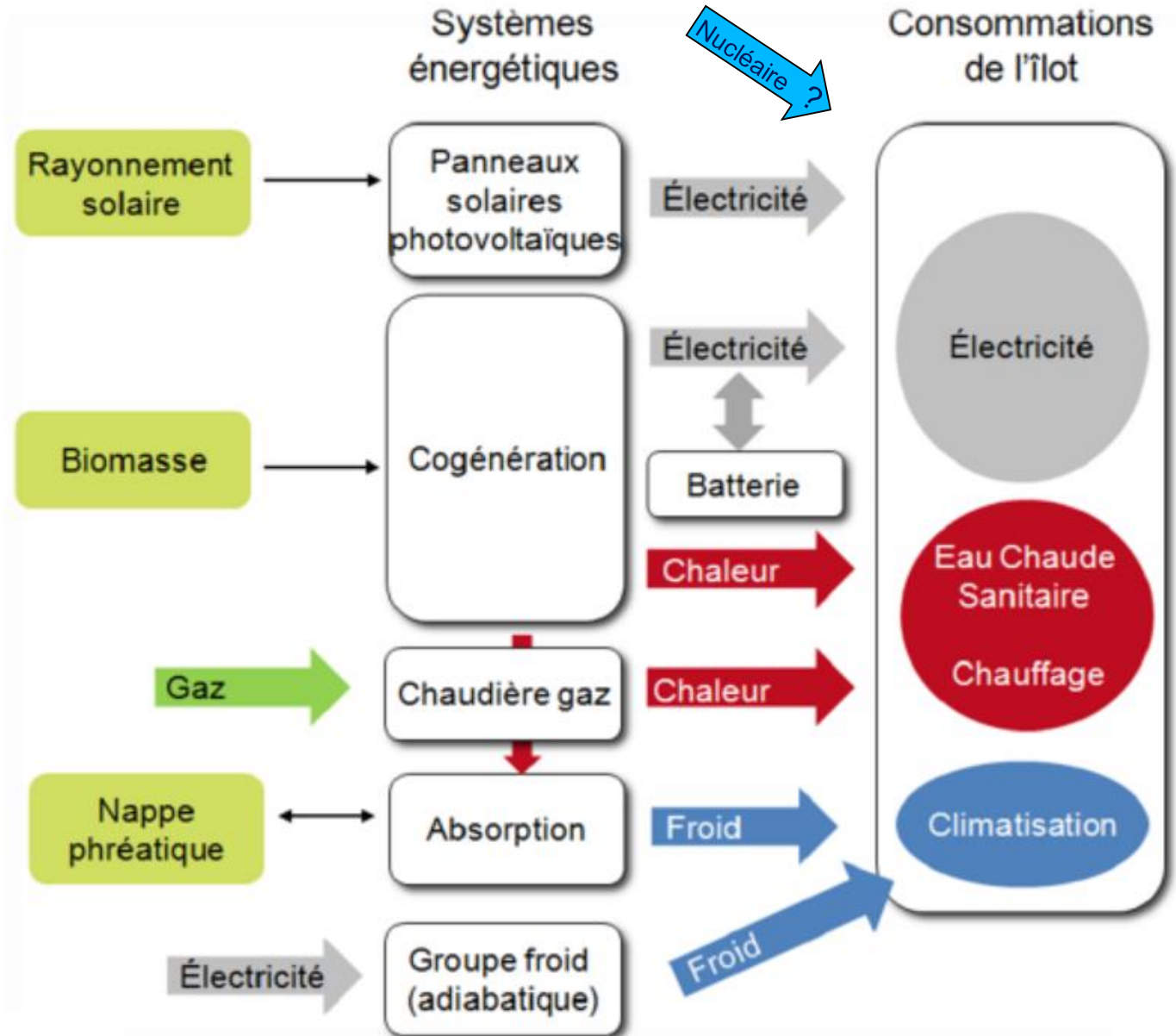
# Nécessité d'un MIX complémentaire nucléaire/fossile à un MIX complémentaire/renouvelable





# Production simultanée de chaleur, d'électricité et de froid pour l'habitat. Quelles solutions technologiques ?





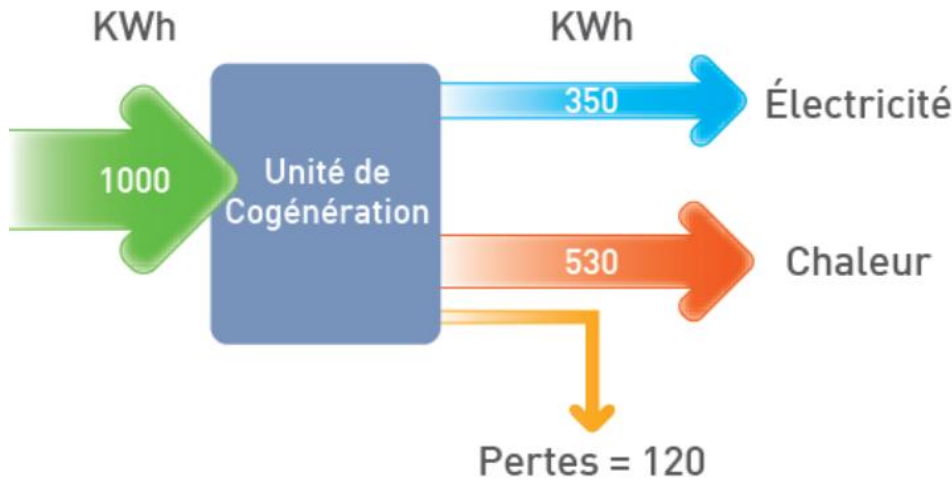


# Principe de la cogénération



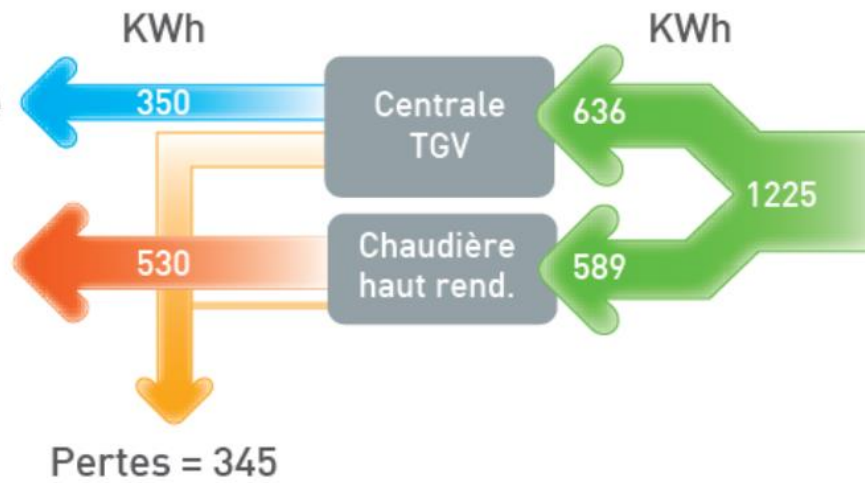
Production simultanée de chaleur et d'électricité

## Cogénération



Rendement global = 88%

## Production séparée

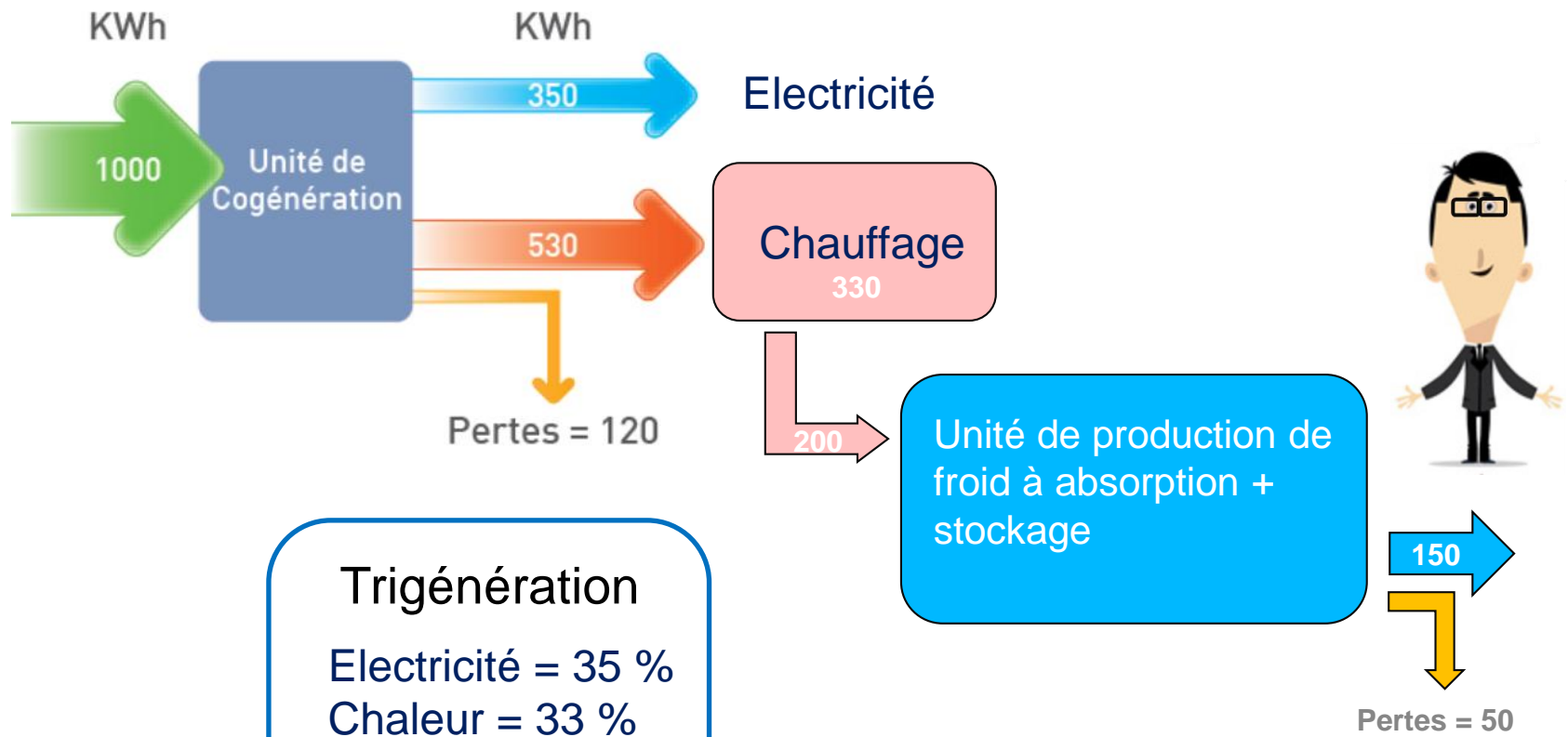


Rendement global = 72%

# Principe de la trigénération

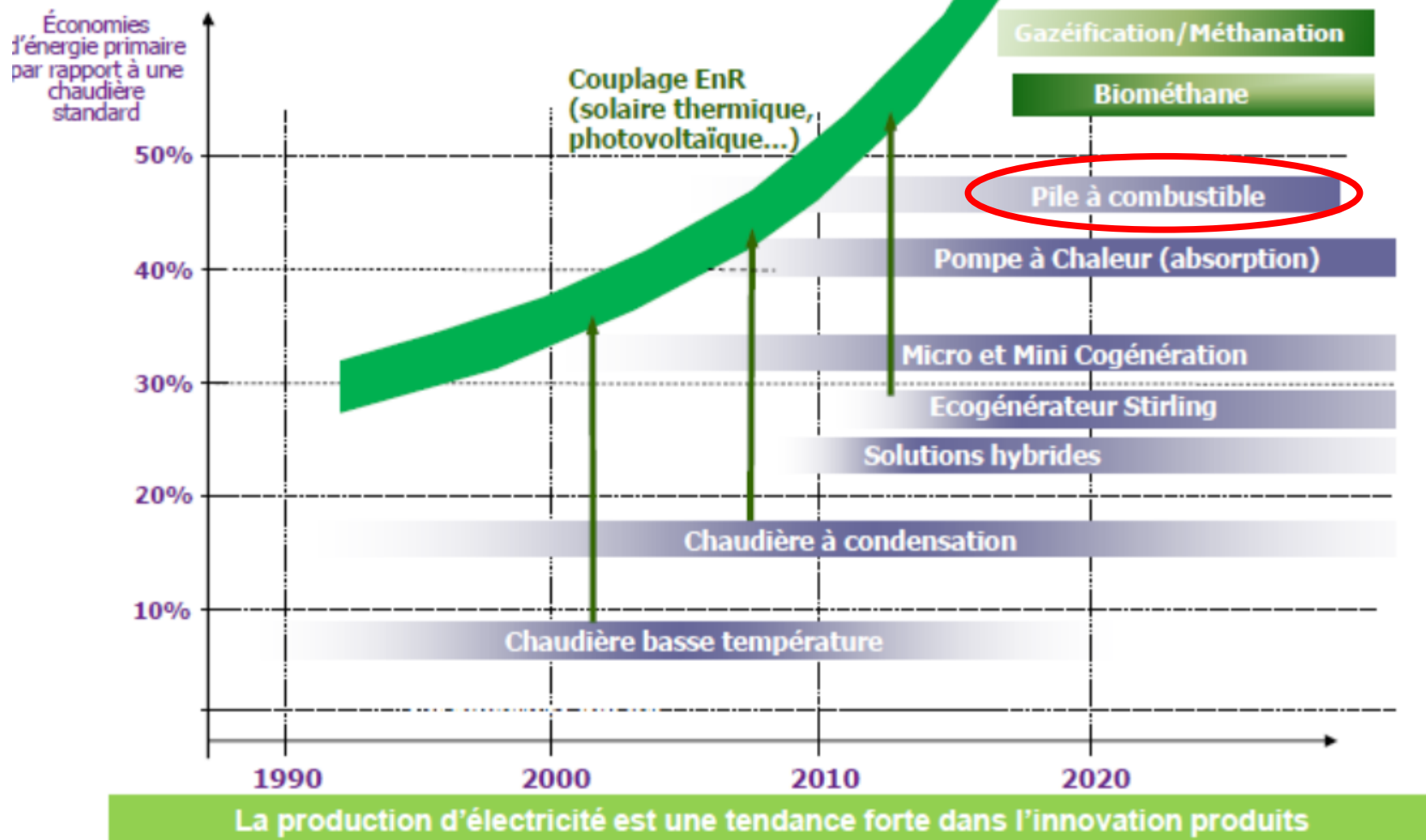
Production simultanée de chaleur et d'électricité + froid

## Trigénération



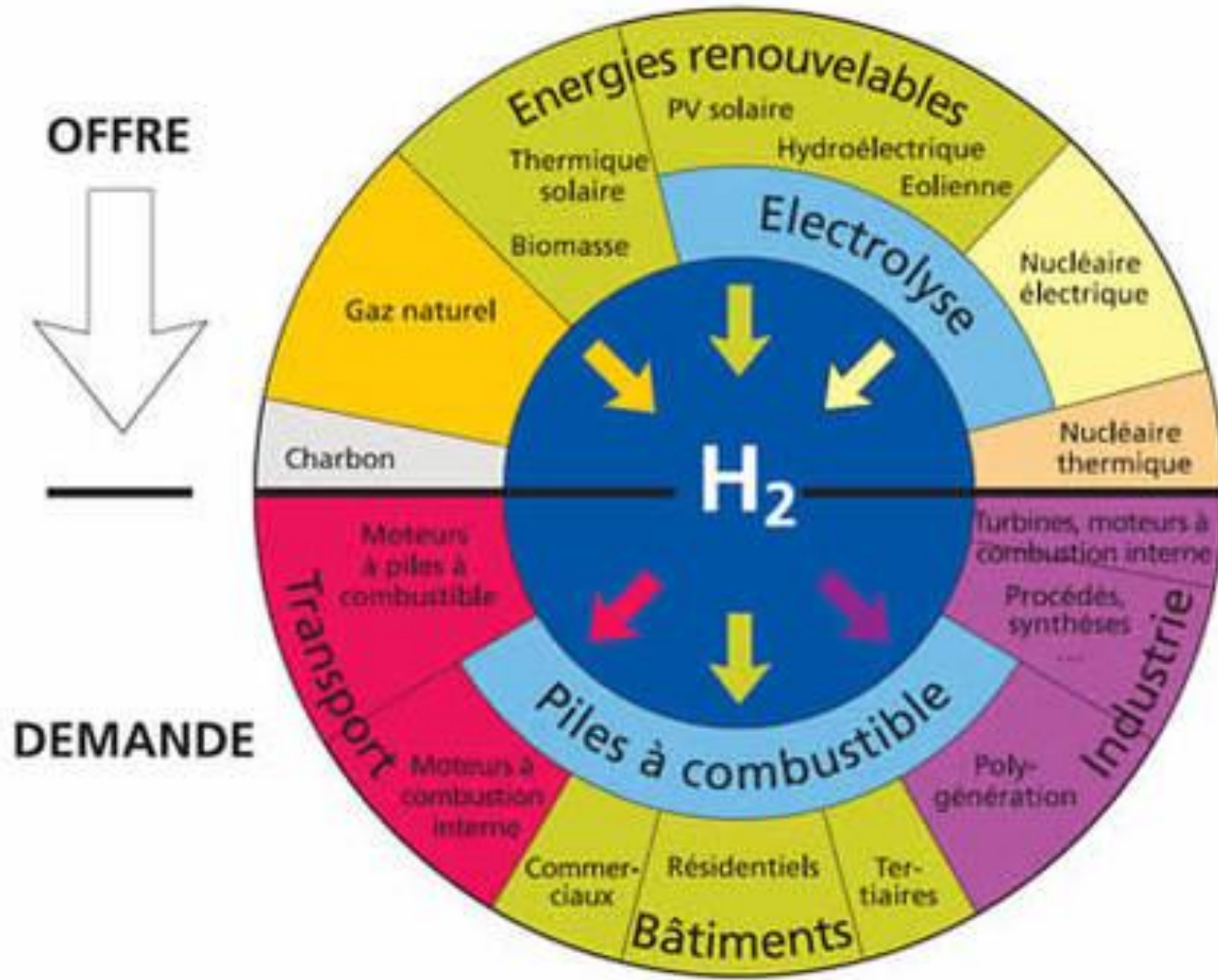
**Trigénération**  
Electricité = 35 %  
Chaleur = 33 %  
Froid = 15 %  
Pertes = 17%

# Unité de cogénération



La chaudière à condensation, référence d'aujourd'hui, évolue

# Production d'hydrogène



# 5 différentes technologies de micro-cogénération au gaz naturel testées en laboratoire et sur sites pilotes

ENGIE  
Lab



Stirling



Rankine



Moteur



Micro Turbine



Pile à combustible

# Marchés clés : rénovation haut de gamme et label BEPOS neuf

Marchés	Rénovation	Neuf
<b>Maison individuelle</b>	Ecogénérateur Stirling Pile à combustible	Pile à combustible
<b>Résidentiel collectif (chaufferies)</b>	1. Module à moteur 2. Ecogénérateur / pile <i>Logement social</i>	1. Module à moteur 2. Ecogénérateur / pile <i>Logement social et label en privé</i>
<b>Tertiaire</b>	Module à moteur <i>Santé, Hôtels voire bureaux (CPE)</i>	Module à moteur <i>Santé, Hôtels voire bureaux (label BEPOS)</i>

**Une niche à trouver pour développer le marché ?**

Plusieurs acteurs institutionnels ont mis en avant le potentiel de la micro/mini-cogénération

Dans son scénario 2030, l'ADEME mentionne l'arrivée de la micro-cogénération

Dès 2010, la DGEC identifiait un potentiel fort pour la cogénération

Des chiffres encourageants issus du projet CODE2 : 9000 unités en 2020

La réglementation thermique et l'augmentation du prix de l'électricité seront les leviers de développement de la micro/mini-cogénération

# Alliance Immobilier (Moselle) : maison neuve équipée d'une pile à combustible 750 We



## CHAUDIERE CONDENSATION VITODENS 111

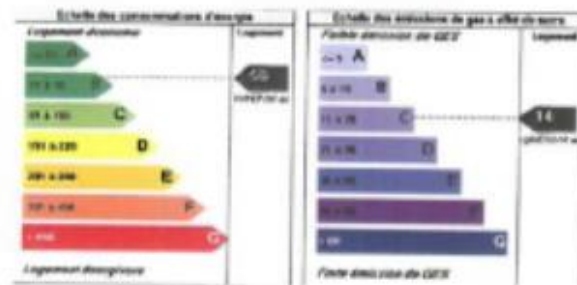
Values expressed in kWh/m² (DIN EN 12831)

	Bbio	Bbio Max	Gain en %
Bbio	73.500	79.900	8.01
Cep	54.500	60.900	10.51

### Consommations annuelles

	Energie finale	Energie primaire
Chauf.	38.700	41.500
Refruid.	0.000	0.000
Ecs	13.000	13.200
Eclair.	1.700	4.400
Aux.dist.	0.700	1.900
Aux.vent.	0.500	1.300
Photovolt.	-3.100	-7.900

### Etiquettes énergie et climat



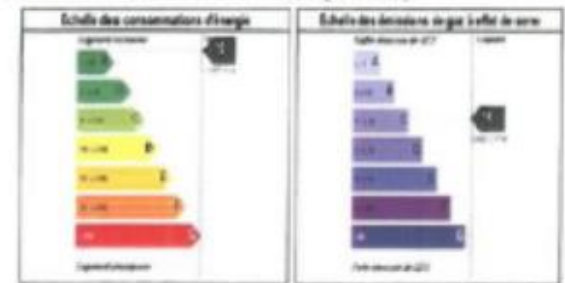
Values expressed in function of the surface habitable

## CHAUDIERE PILE A COMBUSTIBLE VITOTALOR

	Bbio	Bbio Max	Gain en %
Bbio	73.500	79.900	8.01
Cep	-8.100	60.900	113.30

	Energie finale	Energie primaire
Chauf.	38.800	41.500
Refruid.	0.000	0.000
Ecs	13.400	13.600
Eclair.	1.700	4.400
Aux.dist.	0.700	1.900
Aux.vent.	0.500	1.300
Photovolt.	-3.100	-7.900
Prod. élec.	-24.400	-62.900

La maison produit plus d'énergie qu'elle n'en consomme → BEPOS  
(consommations réglementaires au sens des règles TRACES)



Values expressed in function of the surface habitable

PROJET EN ATTENTE VALIDATION TITRE V



# REX sur la technologie pile à combustible au gaz naturel

- Via le financement par GRDF, **ENGIE LAB CRIGEN** a mené des tests en laboratoire et suit **sur le terrain 53 systèmes en France** (notamment avec ENGIE HOME SERVICE)
- **9 fabricants évalués** couvrant l'ensemble des technologies de pile à combustible au gaz naturel disponibles pour les marchés résidentiel et petit tertiaire (**PEMFC, SOFC**)
- **130 000 heures** de fonctionnement cumulées de tests terrain
- **100 MWh** produits en France
- Technologie **fiable** (peu de maintenance réalisée sur les cœurs de pile)
- **Satisfaction clients** (confort assuré)
- **Diminution de la consommation sur énergie primaire** (entre 5% et 20%)
- **Préparation de la filière** à l'installation et à la maintenance indispensable pour le déploiement de cette technologie en France



VISSMANN



RBZ



BOSCH



VAILLANT



SENERTEC DeDietric



# Piles à combustible



## Piles de type PEMFC :

- Baxi Innotech Gamma Premio (5)
- Viessmann VitoValor 300-P (3)
- Elcore 2400 (5)
- InHouse 5000+ de RBZ (3)



## Piles de type SOFC :

- Vaillant G5 (G6) (10)
- Hexis Galileo (5)
- Bosch Home Cell 10 (5)
- BlueGen



# Ecogénérateurs Stirling



Tests en laboratoire et sur le terrain des écogénérateurs Stirling de Viessmann et De Dietrich

Rendement global  $> 105\%$  sur PCI  
Rendement électrique 10-15%

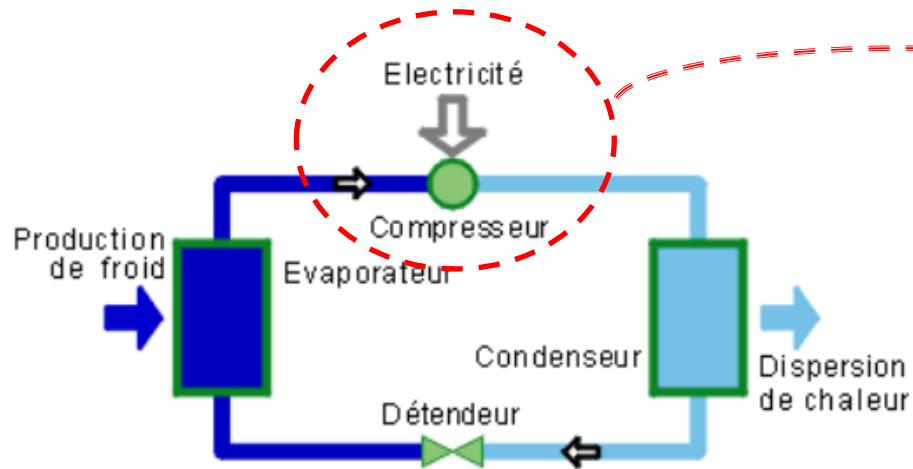
Produit adapté au marché de la maison existante



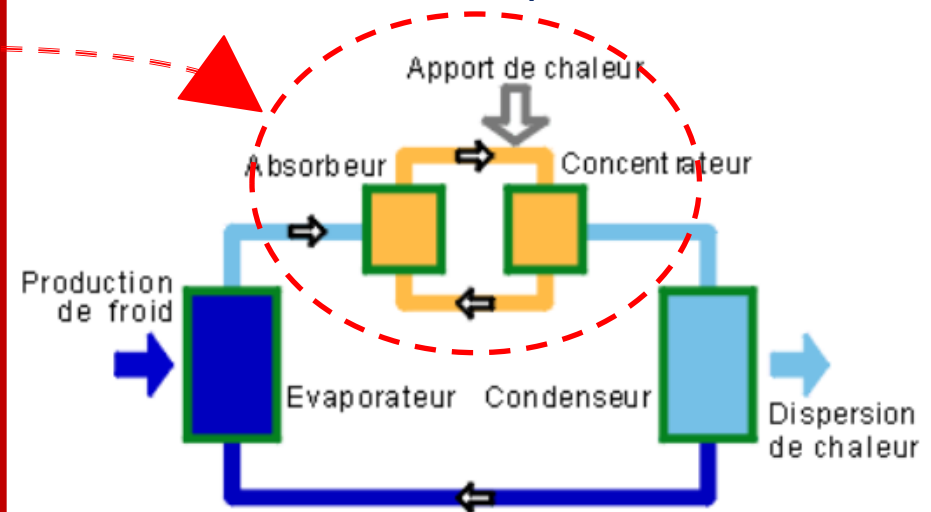
# Production de froid (Rafraîchissement, climatisation)

## Machine frigorifique

### À compression de vapeur



### À absorption



# Machine frigorifique à absorption



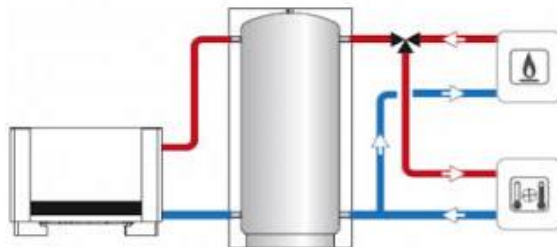
Production de froid à  $-6^{\circ}\text{C}$   
À partir d'une source chaude entre  $85$  et  $90^{\circ}\text{C}$

$\text{COP} = 0,7$   
 $100 \text{ kW th. à } 87^{\circ}\text{C}$  peuvent fournir  $70 \text{ kW}$

# Machine frigorifique associée à un système de stockage de froid



	<b>Sensible (eau chaude)</b>	<b>Sensible (sels fondus)</b>	<b>Latent (paraffine)</b>	<b>Thermochimique (lit de zéolithe)</b>
<b>Densité énergétique</b>	Faible 35 kWh/m <sup>3</sup>	Moyenne 60-70 kWh/m <sup>3</sup>	Moyenne 50-60 kWh/m <sup>3</sup>	Élevée 150 kWh <sub>th</sub> /m <sup>3</sup>
<b>Prix du matériau de stockage</b>	Faible CAPEX : ~ 2-12 €/kWh <sub>th</sub> OPEX : ~ 0,05€/kWh <sub>th</sub> /an	Faible CAPEX : ~ 20€/kWh <sub>th</sub> OPEX : ~ 0,3€/kWh <sub>th</sub> /an	Elevé CAPEX : 220-320 €/kWh <sub>th</sub> OPEX : ~0,7 €/kWh <sub>th</sub> /an	Moyen CAPEX : ~40 €/kWh <sub>th</sub> OPEX : ~0,4 €/kWh <sub>th</sub> /an
<b>Température de stockage</b>	< 100°C	200°C – 350°C	- 20°C – 90°C	Jusqu'à 250°C
<b>Durée de stockage</b>	Limitée (pertes thermiques)	Limitée (pertes thermiques)	Limitée (pertes thermiques)	Théoriquement illimitée
<b>Transport de l'énergie</b>	Faible distance	Faible distance	Faible distance	Distance théoriquement illimitée
<b>Durée de vie</b>	20 - 30 ans	20	20 000 – 100 000 cycles	5 000 à 10 000 cycles
<b>Maturité (récupération de chaleur fatale)</b>	Commercialisé	Commercialisé	Échelle pilote laboratoire	Échelle pilote industriel
<b>Technologie</b>	Simple	Simple	Moyenne	Complexe



OPEX = dépenses d'exploitation sont les charges courantes pour exploiter un produit, une entreprise, ou un système.

CAPEX = dépenses d'investissement se réfèrent aux immobilisations

# Conclusion et Perspectives

Climat / Environnement

Enjeux sociétaux

Durabilité des territoires

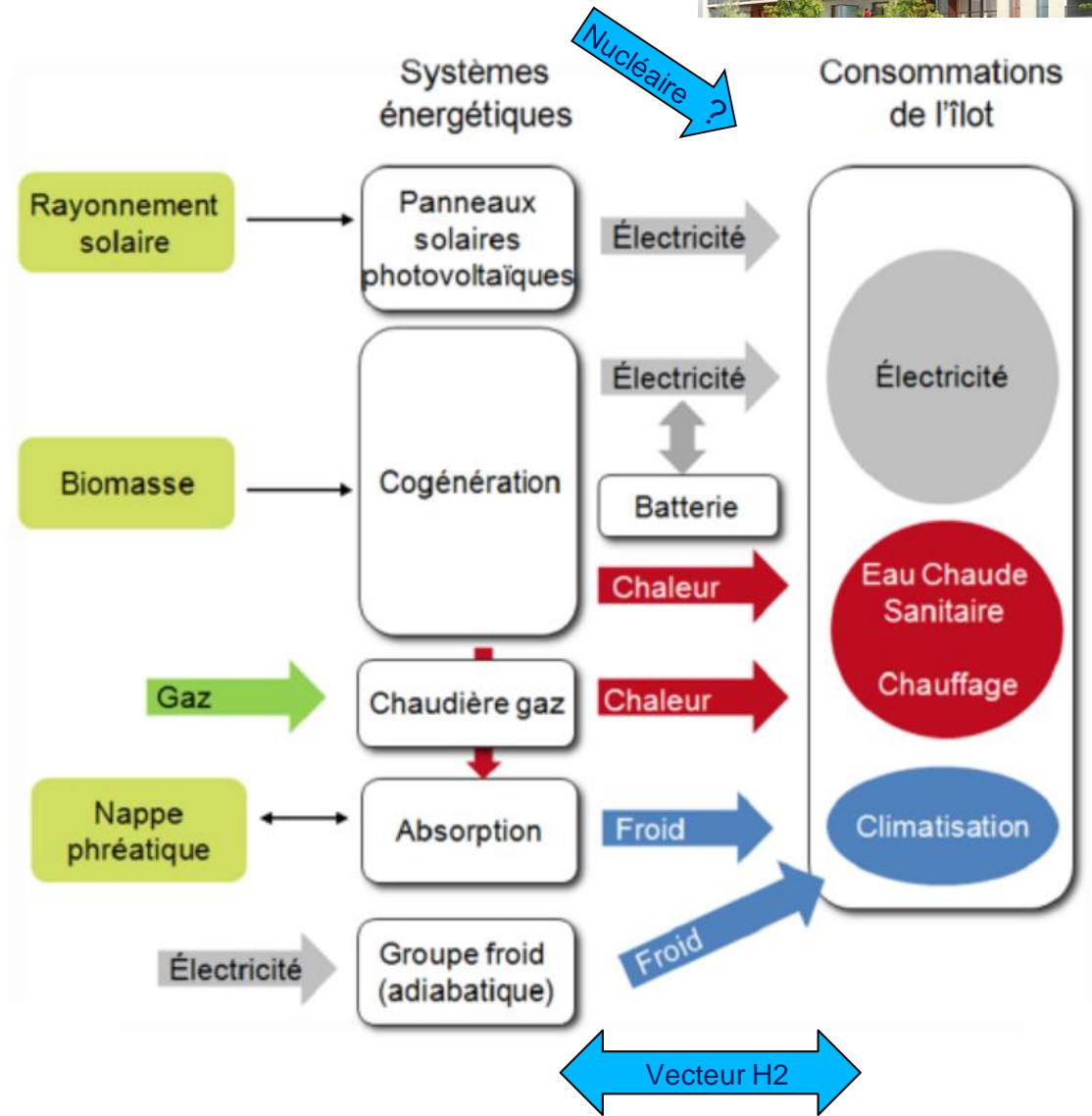
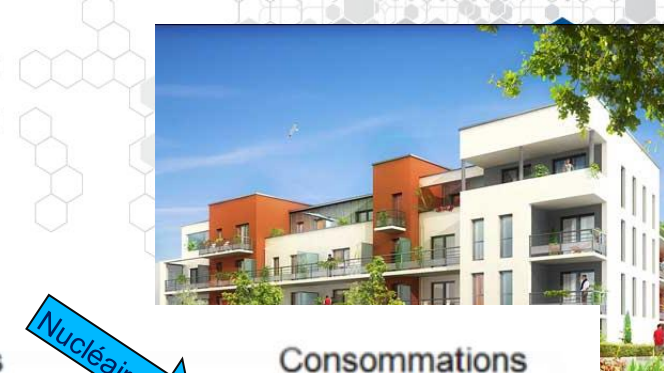
Emplois

Lutte contre la précarité énergétique

Qualité de vie

Acceptabilité sociétale

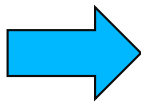
Transition de vie



# Quelques liens internet



- [1] [www.femto-st.fr](http://www.femto-st.fr)
- [2] [www.fclab.fr](http://www.fclab.fr)
- [3] [www.h2sys.fr/fr](http://www.h2sys.fr/fr)
- [4] <http://www.ananke.company/fr>
- [5] [www.ademe.fr](http://www.ademe.fr)
- [6] [www.ajena.org](http://www.ajena.org)
- [7] Journées Nationales sur la Récupération et le Stockage d'Energie : <https://jnrs-2018.sciencesconf.org/>
- [8] Journées Cogénération : <http://events.femto-st.fr/Journees-Cogeneration/journee-2018>
- [9] Congrès IEEE VPPC : <http://www.vppc2017.org/>



3 spin-off

H2SYS : hydrogène-énergie  
applications stationnaires, mobilité

ANANKÉ : cogénération  
valorisation des chaleurs fatales

NEXTPAC : froid magnétique

# H2SYS : hydrogène-énergie applications stationnaires, mobilité

## Mobile power generators

### Hybridized hydrogen-based power generators

- Optimized design versus requirements
- Advanced control and diagnostics
- High efficiency
- Zero noise
- Zero pollutant emissions
- Indoor & outdoor operation ability
- From 1kW to 20kW electrical power
- Fast refueling (less than 2 minutes)



## u-CHP systems

### Panasonic CHP Fuel Cell

Starting commercialization 2011

Features:

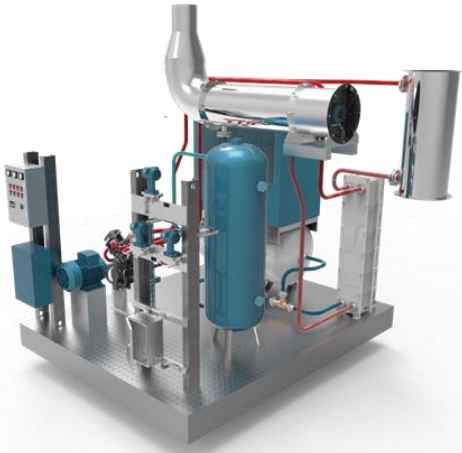
- 750W electrical power (rated)
- 1080W thermal power (rated)
- Fuel : city gas





# ANANKÉ : cogénération valorisation des chaleurs fatales

Développement d'un Moteur à Apport de Chaleur Externe (M.A.C.E.) innovant basé sur le principe du cycle d'Ericsson. Cette machine thermique permet la production simultanée d'électricité et de chaleur utile (cogénération), à partir de n'importe quelle source de chaleur dont la température est supérieure à 450°C.



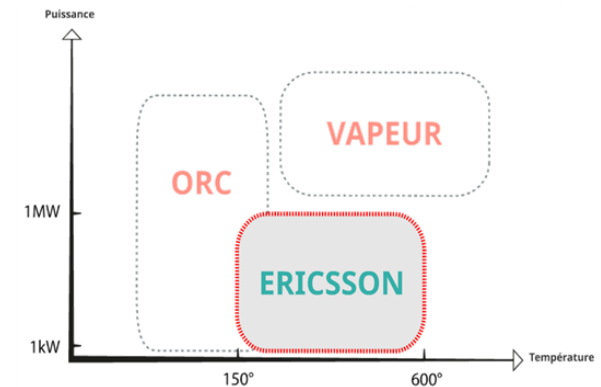
## La technologie

Moteur à soupapes commandées pour contrôle de l'écoulement de l'air entre une chambre de compression et une chambre de détente

→ Modulation de la puissance produite en conservant un haut rendement quel que soit le point de fonctionnement.

Plusieurs démonstrateurs réalisés par la société Ananké avec le laboratoire FEMTO-ST

→ Confirmation technique de la pertinence de cette technologie : bonnes performances, faible nombre de pièces et coût d'industrialisation compétitif.



## Chiffres clefs

Température des fumées : 450°C – 900°C

Gamme de puissance : 1kWe à 1MWe

Rendement électrique cible > 30%

Coûts cibles < 3000€/kWe installé

Temps de retour sur investissement < 3 ans

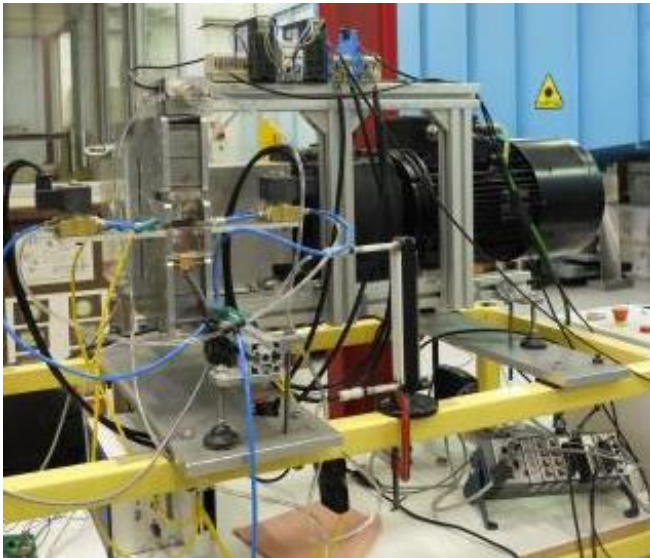
## Applications et marchés

Intégration dans un procédé industriel émetteur de chaleur fatale : métallurgie, verrerie, cimenterie

Valorisation jusqu'à 90% de chaleur fatale : 30% en énergie électrique / 70% en énergie thermique

## NEXTPAC : froid magnétique

- Magnétocalorie
- Pompe à chaleur



NEXTPAC travaille à la mise au point de nouvelles technologies de pompe à chaleur climato-compatibles en vue de proposer des solutions B2B répondant au renouvellement majeur impulsé en Europe au marché du chauffage, de la ventilation, de l'air conditionné et de la réfrigération par la réglementation F-GAZ (2015) et au niveau mondial par l'accord de KIGALI.

Ces nouvelles réglementations vont en effet progressivement interdire d'ici 2030-2035 l'usage de 85% des HFC (HydroFluoroCarbure), qui sont de très puissants gaz à effet de serre et sont au coeur des technologies actuelles.



# Production simultanée de chaleur, d'électricité et de froid pour l'habitat. Quelles solutions technologiques ?

François Lanzetta

Directeur du département ENERGIE de l'institut FEMTO-ST  
Professeur à l'Université de Franche-Comté

[www.femto-st.fr](http://www.femto-st.fr)

