

Les machines ORC

Une technologie mature et fiable pour l'efficacité énergétique et économique des centrales à moteur à gaz ou Diesel

Mars 2021

<u>Avant-propos</u>	<u>03</u>
<u>La technologie ORC pour valoriser la chaleur fatale des centrales à moteur Diesel ou à gaz</u>	<u>04</u>
<u>Intérêt économique et environnemental</u>	<u>13</u>
<u>Le modèle ESCO tiers-financé pour l'installation et l'exploitation de machines ORC</u>	<u>21</u>

Les objectifs ambitieux de l'Accord de Paris sur le climat poussent à multiplier dès aujourd'hui les initiatives d'efficacité énergétique

Afin de lutter contre le dérèglement climatique et ses conséquences, l'Accord de Paris de 2016 s'est donné l'objectif central de **maintenir l'augmentation de la température mondiale à un niveau inférieur à 2 °C** par rapport au niveau préindustriel.

Pourtant, près de 5 ans après sa signature, nous nous trouvons dans l'un des pires scénarios établis en 2014 par le Groupe d'Experts Intergouvernemental sur l'évolution du Climat (GIEC)^{1,2} : on constate déjà +1 °C de réchauffement et ce scénario prévoit **au rythme actuel d'émission de GES, plus de 5 °C de réchauffement en 2100**.

Dans ce contexte, **l'utilisation plus appropriée des ressources financières et des politiques plus efficaces de tarification du carbone, en premier lieu par les États**, paraissent indispensables pour générer les initiatives technologiques et sociétales nécessaires à l'atteinte des objectifs de l'Accord de Paris. Une inflexion semble d'ailleurs se dessiner à l'occasion de la crise économique liée à la pandémie de Covid-19.

En outre, dans son même rapport, le GIEC¹ indique que pour l'année 2010, **le secteur de l'énergie – extraction, électricité et chaleur – est responsable de plus du tiers des émissions** mondiales cumulées de GES anthropique. Il représente donc un enjeu majeur.

Au-delà des débats sur le niveau des stocks des ressources fossiles (charbon, pétrole et gaz), il apparaît primordial de s'interroger sur **l'efficacité énergétique des solutions existantes** qui représente, selon l'Agence Internationale de l'Energie, la première source de réduction des émissions de CO₂ (44%), **en particulier lorsqu'il s'agit de combustibles fossiles**.

Dans ce domaine, il existe d'ores et déjà des solutions matures et fiables qui, cependant, ne paraissent pas exploitées à la mesure de leur potentiel au regard de l'enjeu.

Cette étude s'intéresse à l'une de ces solutions d'efficacité énergétique : les **machines à Cycle Organique de Rankine** (abrégé ORC en anglais). Installées sur des centrales thermiques ou des usines de production, elles sont alimentées par une énergie « gratuite » – **la chaleur fatale des procédés** – et produisent une électricité compétitive et décarbonée.

L'étude expose **le potentiel de cette technologie pour les centrales électriques à moteur Diesel ou à gaz**, en termes à la fois économique et environnemental, ainsi que les moyens à disposition des exploitants pour financer des investissements pouvant être considérés comme importants.



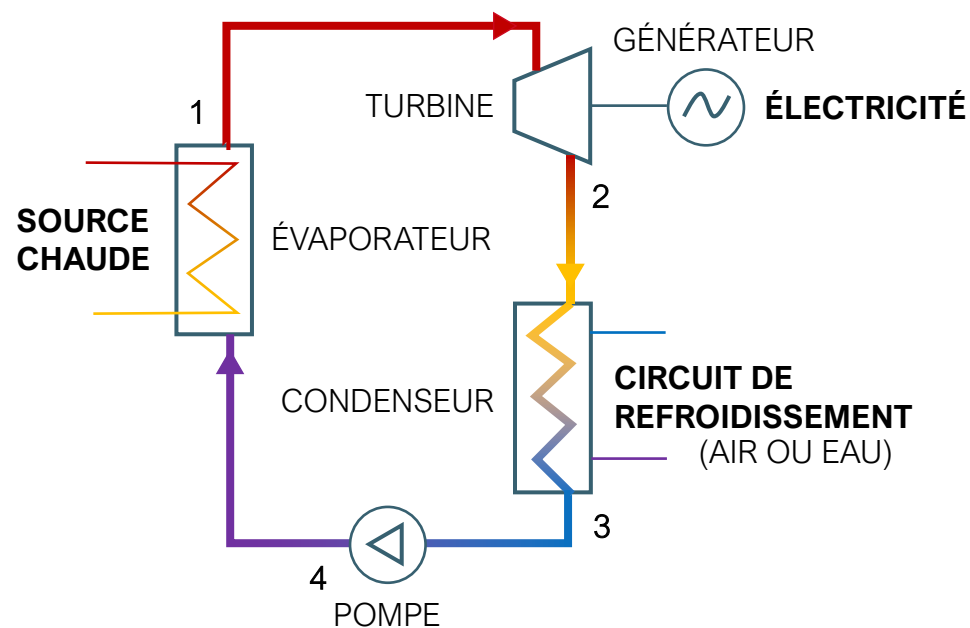
La technologie ORC pour valoriser la chaleur fatale des centrales à moteur

Un marché insuffisamment exploité

Les machines à Cycle Organique de Rankine (ORC) sont utilisées pour valoriser de la chaleur en la convertissant en énergie électrique

La technologie ORC est aujourd'hui mature : les premiers développements remontent au XIX^e siècle et des milliers de machines sont installées dans le monde à ce jour. Afin de générer de l'énergie mécanique ou électrique, un cycle ORC fonctionne entre une source chaude (la chaleur à valoriser) sur une plage de température comprise entre 120 °C et 350 °C et une source froide (refroidissements à l'air ambiant ou à l'eau). Plus la différence de température entre la source chaude et la source froide est importante, meilleur est le rendement de l'installation.

Principe de fonctionnement d'un cycle ORC simplifié (sans récupérateur)



VAPORISATION À PRESSION CONSTANTE

Un fluide organique de travail contenu dans le module ORC s'évapore en recevant l'énergie thermique apportée par une boucle de récupération (le fluide primaire pouvant être de l'huile thermique, de la vapeur d'eau ou de l'eau pressurisée).

DÉTENTE ISENTROPIQUE

La vapeur de fluide organique (à haute pression) ainsi obtenue est détendue dans la turbine. Cette dernière entraînant un alternateur, cela permet la production d'électricité. En sortie de turbine, le fluide organique est toujours à l'état gazeux.

CONDENSATION À PRESSION CONSTANTE

Un condenseur (à eau ou air) assure le retour de la vapeur basse pression à l'état liquide.

COMPRESSION ISENTROPIQUE

Une pompe permet de terminer le cycle et assure le retour du fluide de travail dans l'évaporateur.

Il est à noter que la récupération de chaleur résiduelle des ORC autorise fréquemment des applications complémentaires à la génération d'électricité, telles que la fourniture de chaleur à un réseau de chauffage urbain ou à usage industriel (cogénération), voire la production de froid.

Si la géothermie et la biomasse constituent les principales sources de chaleur valorisée par les ORC, la récupération de chaleur fatale est une application en forte croissance

VALORISATION DE LA GÉOTHERMIE OU DE LA BIOMASSE



Aujourd'hui, l'essentiel des machines ORC utilisent des sources renouvelables de chaleur primaire, principalement les **saumures géothermiques**, mais aussi la **biomasse** et de manière négligeable le **solaire**. Dans ce cas, l'ORC constitue elle-même la **machine de la centrale**.

RÉCUPÉRATION DE CHALEUR FATALE

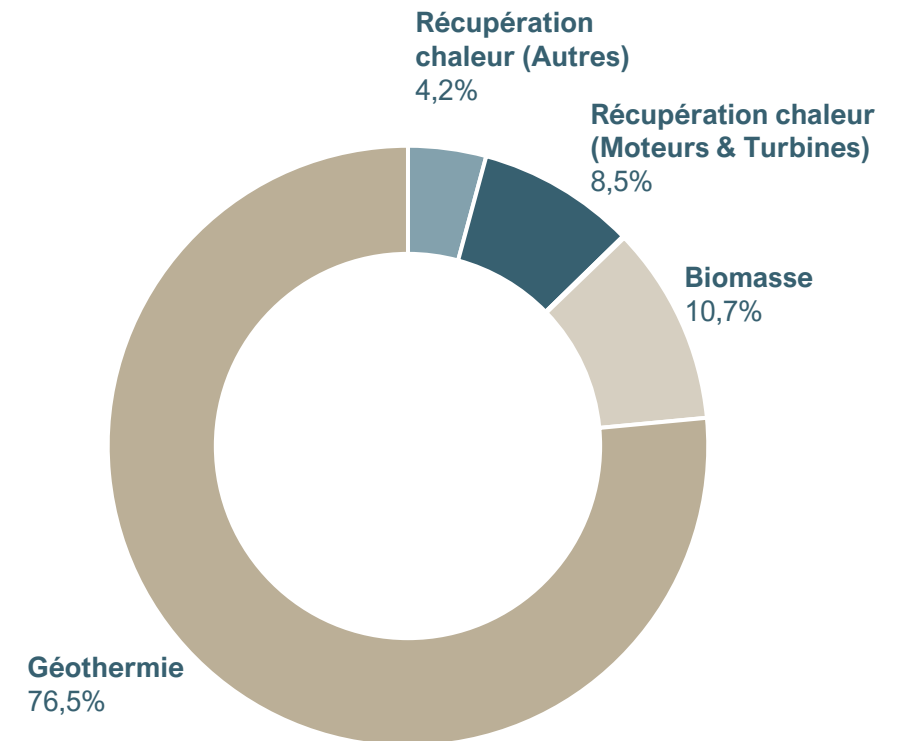


Les machines ORC de moyenne à grande taille représentent la technologie la plus prometteuse pour valoriser la chaleur dont la température est supérieure à 150°C. Cela permet d'améliorer l'efficacité énergétique **des turbines à combustion industrielles, des moteurs à combustion interne et de procédés industriels**. Dans ce cas, l'ORC constitue un module externe raccordé à l'unité de production dont elle valorise la **chaleur fatale, c'est-à-dire la « chaleur générée par le procédé qui n'en constitue pas la finalité première, et qui n'est pas récupérée »**².

13% de la capacité totale installée des machines ORC : la récupération de chaleur fatale reste un domaine émergent pour les machines ORC.

2/3 des applications de valorisation de la chaleur fatale concernent les centrales thermiques (turbines à gaz ou moteurs à combustion interne). Compte tenu des températures élevées à valoriser, ces applications représentent un potentiel important en terme économique et énergétique.

Capacité totale installée (%MW), par application, 2016¹



- Capacité totale installée : 2 701 MW_e pour 1 754 unités ORC
- Nouvelle capacité planifiée : 460 MW_e

Bien que fortement émettrices de CO₂, les centrales à moteur seront difficilement remplaçables à court ou moyen terme pour l’approvisionnement électrique de certaines zones du globe

CAS D'USAGE

Les centrales à moteur présentent différentes configurations d'exploitation qui répondent aux enjeux énergétiques contemporains et probablement futurs :

- **Centrales de production de base** dans des zones non interconnectées aux grands réseaux électriques continentaux (îles éloignées des côtes par exemple) ou celles hébergeant des industries très consommatrices d'électricité (mines par exemple) ou encore celles dont la consommation électrique croît très rapidement (Afrique, Amérique du Sud, Asie du Sud-Est mais aussi États-Unis ; en effet ces centrales peuvent être mises en service et produire en peu de temps).
- **Centrales de pointe**, en complément de la production d'électricité intermittente (solaire, éolien) ou d'une production peu modulable. Ceci assure une certaine fiabilité de fourniture, grâce notamment à un temps de démarrage très court (pleine charge atteinte en quelques minutes).



COMBUSTIBLES

Les moteurs peuvent consommer une grande variété de combustibles, en fonction de considérations de disponibilité, économique ou environnementale :

- **Fioul lourd** plus économique
- **Fioul à basse teneur en soufre** moins polluant (SO_x)
- **Gaz naturel** et **biocombustibles** moins émetteurs de CO₂ par kWh produit



CAPACITÉ INSTALLÉE

23 GW^{1,2} soit l'équivalent de 25 réacteurs nucléaires de puissance moyenne (900 MW), distribués sur plusieurs milliers de centrales à moteur dont la capacité varie de quelques centaines de kW à plus de 500 MW



ÉMISSIONS DE CO₂

54 M tonnes par an³






soit l'équivalent des émissions totales du Portugal en 2019⁴

Hypothèses d'émissions directes de CO₂ :







- fiouls : 424 g/kWh
- gaz naturel : 227 g/kWh




Pour les systèmes insulaires isolés, les générateurs Diesel représentent souvent le meilleur choix de production de base

ENJEUX DE LA PRODUCTION D'ÉLECTRICITÉ POUR LES SYSTÈMES INSULAIRES ISOLÉS

-  L'éloignement géographique des infrastructures continentales ne permet pas un raccordement aux grands réseaux électriques
-  L'absence d'économie d'échelle n'autorise pas l'installation de centrales de large capacité, efficaces en termes de coûts
-  Pour les générateurs insulaires, le choix du combustible est restreint : accès difficile à du combustible stockable, absence de terminal charbonnier ou gazier...
-  Un besoin élevé de flexibilité pour suivre les variations quotidiennes et saisonnières de la demande d'électricité
-  L'intermittence des sources d'énergie renouvelables (hydraulique, solaire, éolien...)

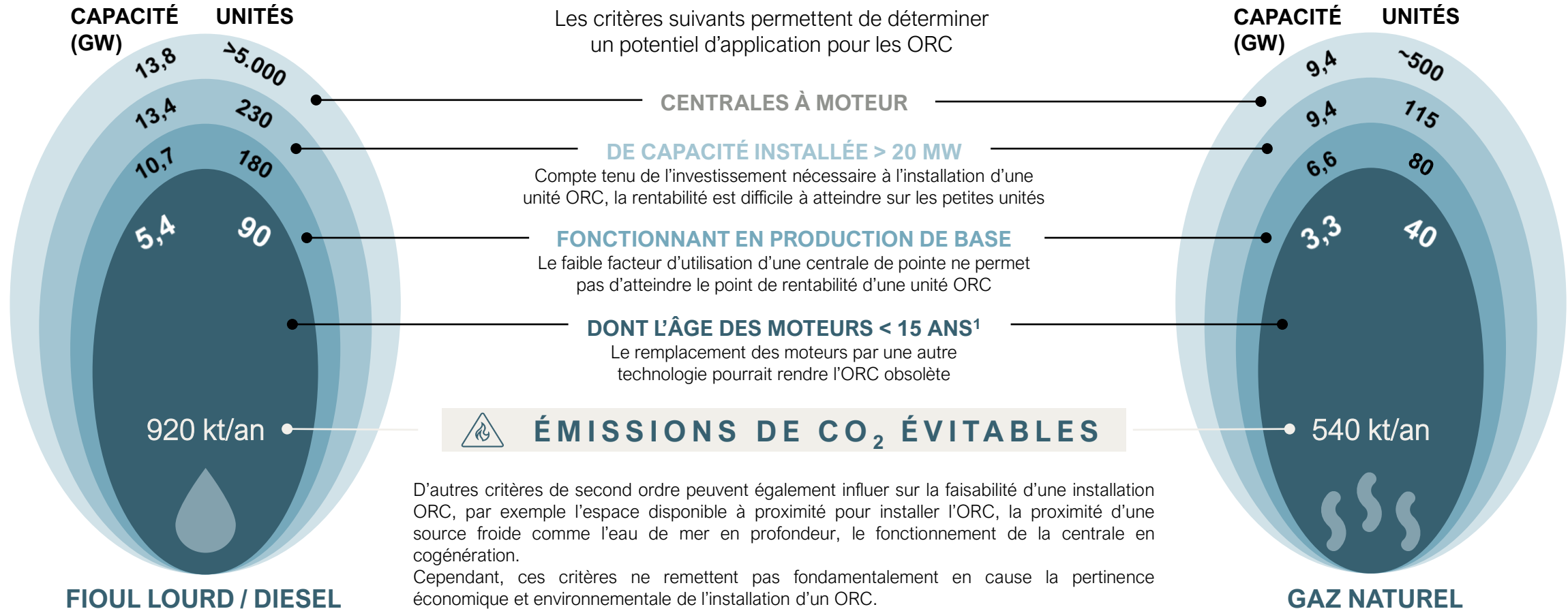
PERTINENCE DES CENTRALES À MOTEUR DIESEL POUR LES SYSTÈMES INSULAIRES ISOLÉS

- 
-  Bonne flexibilité opérationnelle
-  Démarrage rapide
-  Fonctionnement efficace sur une large gamme de puissance demandée
-  Investissement raisonnable
-  Compétences de maintenance largement disponibles dans le Monde

- 
-  Coûts d'exploitation nettement plus élevés que pour les centrales des réseaux continentaux...
-  ...encore accrus par la nécessité d'importer le combustible depuis des zones éloignées

Le coût de l'électricité nettement plus élevé sur les îles peut représenter une **charge importante pour les consommateurs**. De même, des augmentations de tarif pourraient générer des difficultés économiques dans certains territoires insulaires.

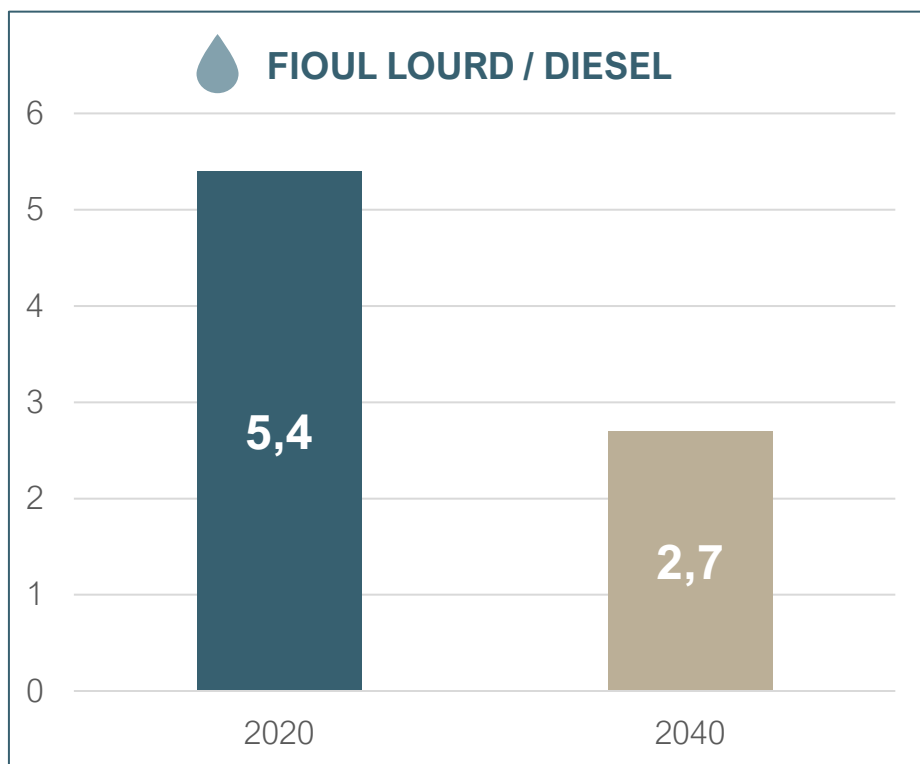
Le parc mondial de centrales à moteur candidates à l'installation d'ORC peut être estimé à ~130 unités pour une capacité totale installée de 9 GW



Il faut souligner que le **nombre d'ORC déjà installés sur ce type d'unités est actuellement très faible** au regard de ce potentiel. Au titre des rares exemples, 3 centrales à moteur (capacité totale ~90 MW) sont équipées d'ORC Turboden en Italie et en Turquie.

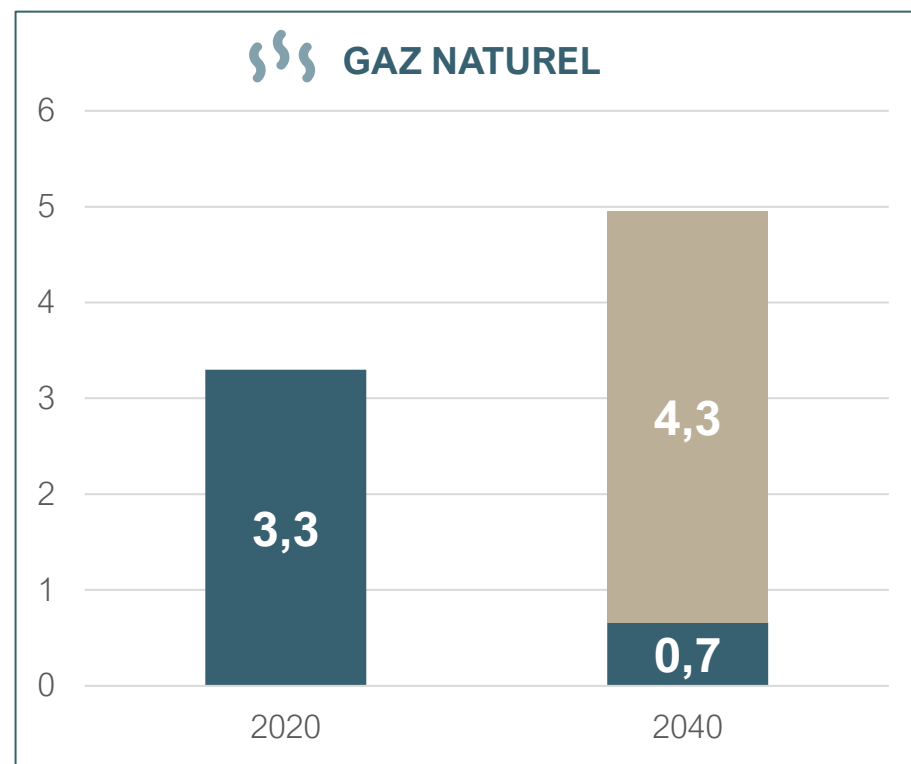
1. Nous prenons comme hypothèse une durée de vie moyenne de 30 ans pour les moteurs de centrale

L'état actuel du parc de centrales, ainsi que l'évolution attendue des conditions de marché, conduisent à envisager un potentiel additionnel d'environ 7 GW pour l'installation d'ORC d'ici 2040



Prévisions sur la période 2020-2040 :

- Réduction de moitié de la capacité installée¹
- Déclassement de la quasi-totalité du parc actuel² (scenario Europe)



Prévisions sur la période 2020-2040 :

- Hausse de 50% de la capacité installée¹
- Déclassement d'environ 80% du parc actuel² (scenario Europe)

- Capacité installée (GW)
- Prévision de nouvelle capacité à installer (GW)

Sources : 1. [Installed power generation capacity by source in the Stated Policies Scenario, 2000-2040 – IEA](#) ; 2. [SAB Discussion Paper on Investment requirements 2015](#)

Malgré ce potentiel, plusieurs facteurs limitent l'adoption et l'installation d'ORC sur les centrales à moteur



LIMITES LIÉES AU COMBUSTIBLE

L'utilisation du fioul lourd comme combustible dans la majorité des centrales à moteur, limite fortement le déploiement actuel des ORC :

- La teneur élevée en soufre du fioul lourd oblige à maintenir au-dessus de 180 °C la température des fumées émises pour empêcher **la formation d'acide sulfurique pouvant endommager les échangeurs de chaleur**. Ce seuil minimal ne permet pas à l'ORC de valoriser pleinement la chaleur fatale.
- Les fumées de combustion du fioul lourd contiennent des polluants : SOx, NOx et particules fines. Afin de limiter l'impact de ces polluants sur les populations, **des équipements de traitement des fumées sont installés sur certaines centrales, ce qui limite la place disponible pour l'installation d'échangeurs de récupération de la chaleur fatale**.
- Le fioul lourd étant très visqueux, il est nécessaire de le chauffer à 60 °C pour l'utiliser comme combustible Diesel. **La chaleur de chauffage ainsi consommée réduit la chaleur à valoriser par l'ORC**. Notons également que la surface occupée pour la préparation du fioul peut empêcher dans certains cas l'installation d'un ORC.
- **Le fioul lourd étant relativement peu cher (environ 300 €/tonne), la faiblesse de l'économie réalisée n'incite pas à l'installation d'une unité ORC**.



LIMITES LIÉES À L'INSTALLATION

L'installation d'échangeurs sur les cheminées d'échappement peut entraîner une **diminution de leur tirage, avec par conséquent, une baisse de rendement des moteurs**.

L'installation d'échangeurs réduit également la température des fumées émises. Plus froides, les fumées se dispersent alors sur une zone plus restreinte autour de la centrale, ce qui **localise la pollution et entraîne des conséquences sanitaires** pour les populations locales.

L'installation d'échangeurs de chaleur nécessite l'arrêt des moteurs. Elle a donc lieu lors des arrêts de maintenance de la centrale. En cas de retard d'installation, **prolonger l'arrêt de maintenance générerait des pertes économiques importantes**.

L'intégration d'un ORC dans le système de contrôle commande de la centrale requiert une **montée en compétence et en ressources** des opérateurs et des équipes de maintenance.

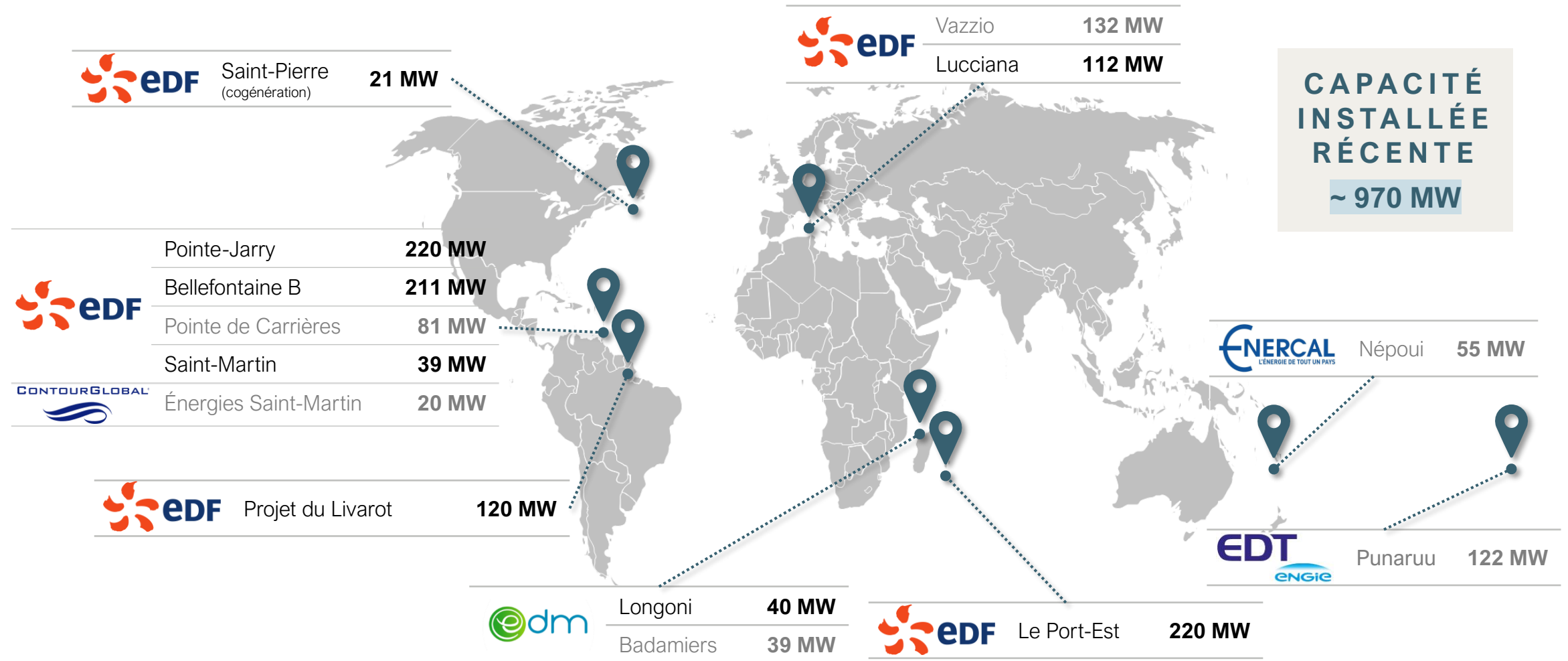


LIMITES ÉCONOMIQUES

Pour un opérateur dont les centrales à moteur occupent une faible part du mix de production, **le gain économique obtenu grâce à l'installation d'ORC sera perçu comme marginal**.

En outre, **les investissements liés à l'installation d'ORC entrent en compétition avec d'autres investissements aujourd'hui plus facilement valorisables** auprès de l'opinion publique, comme l'électricité « verte » (éolien, solaire) ou l'hydrogène.

En France, certaines centrales insulaires à moteur – essentiellement Diesel – restent d'excellentes candidates à l'installation d'un ORC



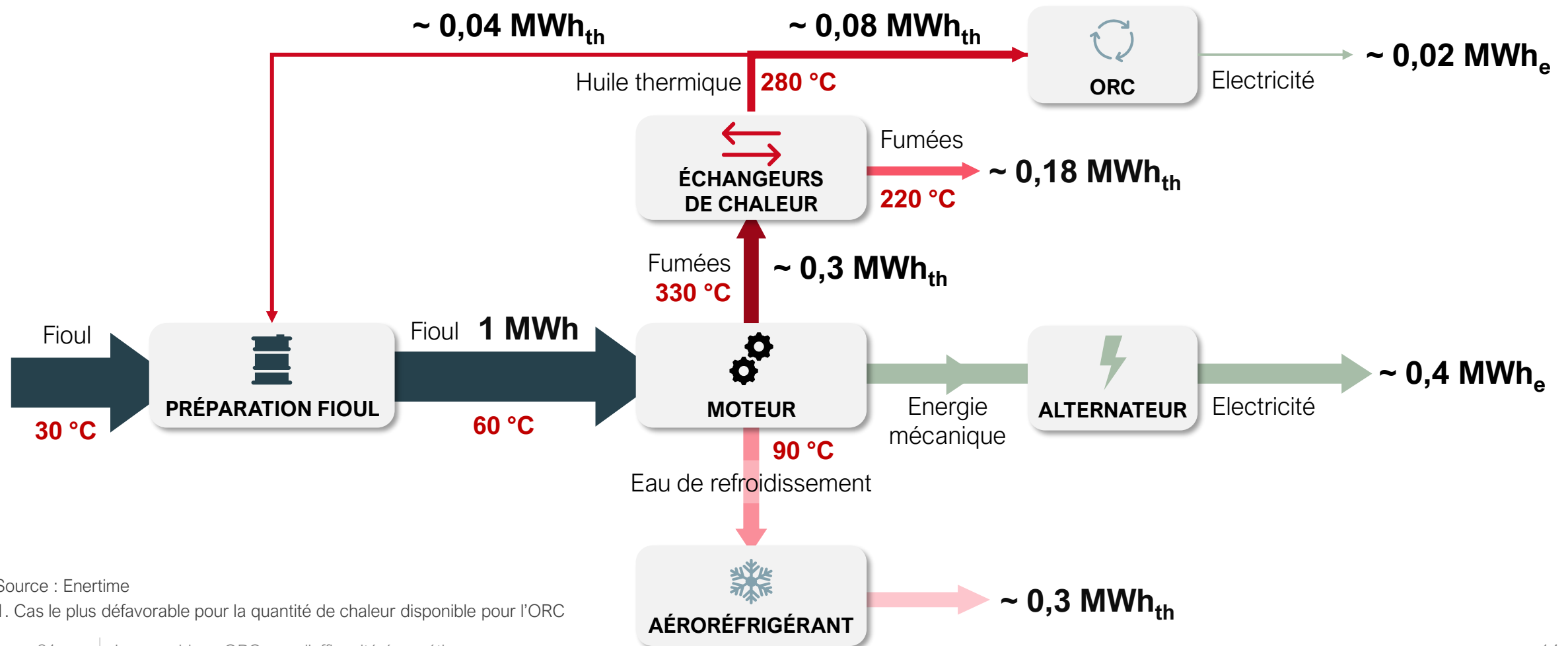
En noir : capacités récentes. En gris : centrales plus anciennes (> 20 ans) susceptibles d'être renouvelées ou bien décommissionnées prochainement (et moins pertinentes pour l'installation d'ORC)

Intérêt économique et environnemental

Une évolution favorable des contextes macro-économique et réglementaire renforce encore la pertinence des machines ORC

La chaleur fatale issue d'une centrale à moteur représente environ 60% de l'énergie tirée du combustible. Une moitié est dispersée via les fumées d'échappement, une autre via le refroidissement par eau des moteurs

FLUX D'ÉNERGIE D'UNE CENTRALE DIESEL AU FIOUL LOURD¹



Source : Enertime

1. Cas le plus défavorable pour la quantité de chaleur disponible pour l'ORC

Du fait de la teneur en carbone du combustible, l'exploitation d'une centrale à moteur émet de 418 à 730 g de CO₂ par kWh électrique produit

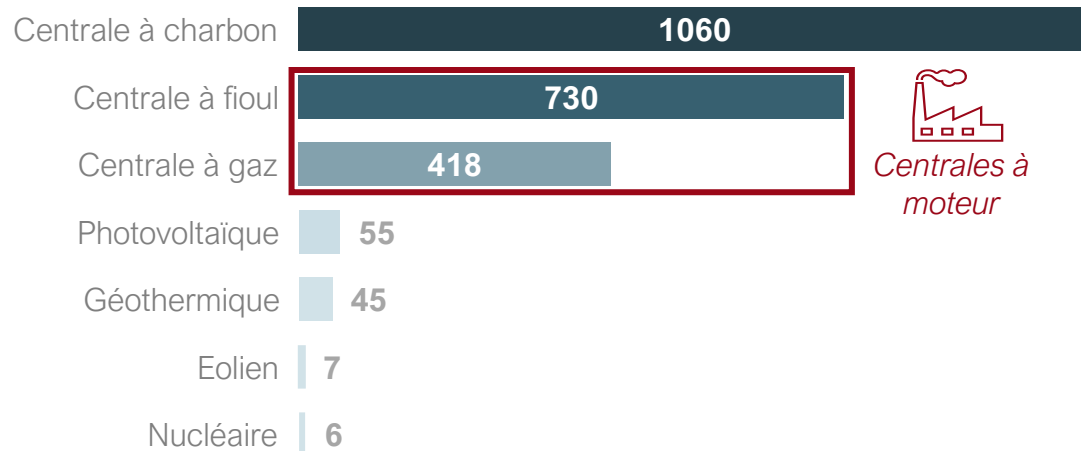


CONSTAT

En considérant les émissions directes et indirectes sur l'ensemble de leur cycle de vie (construction, extraction, approvisionnement du combustible...), **les centrales à fioul ou à gaz sont particulièrement émettrices de CO₂**.

La nature même des combustibles utilisés explique largement ces émissions importantes de CO₂. Le fioul contient plus de 85% de carbone et le gaz naturel de l'ordre de 75%.

Teneur en gCO₂ par kWh produit suivant le type d'exploitation¹



En y ajoutant les émissions indirectes sur l'ensemble de leur cycle de vie, les centrales à fioul et à gaz affichent des bilans respectifs de 730 gCO₂/kWh_e et 418 gCO₂/kWh_e. Elles sont moins émettrices de CO₂ que les centrales à charbon, mais bien plus émettrices que l'éolien ou le nucléaire.

Enfin, les émissions de GES ne sont pas leurs seules émissions problématiques. **Les centrales à moteur à gaz ou au fioul émettent également des polluants** (NO_x, SO_x et particules fines) responsables d'une dégradation de la qualité de l'air qui peut entraîner des risques sanitaires pour les populations locales.

Émission de polluants d'un moteur fonctionnant au fioul lourd²




SO ₂ (g/kWh)	NO _x (g/kWh)	Particules fines (g/kWh)
0,26	0,23	1,28



SOLUTION

La valorisation de la chaleur fatale de ces centrales par l'installation d'ORC permet de générer un supplément d'électricité, autrement dit de réduire la quantité de combustible nécessaire pour produire la même quantité d'électricité. **Ce gain d'efficacité énergétique réduit les émissions de CO₂ et de polluants pour chaque kWh produit.**

Dans le cadre de cette étude, nous avons retenu trois profils de centrale, caractéristiques du parc installé

CARACTÉRISTIQUES	 Centrale Diesel au fioul lourd	 Centrale Diesel au fioul TBTS ¹	 Centrale à moteur au gaz naturel
<i>Puissance électrique installée</i>	60 MW _e	55 MW _e	50 MW _e
<i>Mode d'exploitation</i>	Intermédiaire (5 000 hepp ²)	Intermédiaire (6 000 hepp)	Base (7 000 hepp)
<i>Localisation usuelle</i>	Zone minière	Zone côtière ou insulaire	Pays gazier
<i>Environnement</i>	Températures extérieures élevées	Accès à l'eau de mer	Varié
<i>Baisse de température des fumées à travers les échangeurs³</i>	140 °C	160 °C	190 °C
<i>T° source froide ORC</i>	40 °C (air)	20 °C (eau de mer)	25 °C (air)
<i>Puissance thermique à valoriser en entrée d'ORC</i>	16 MW _{th}	20 MW _{th}	22 MW _{th}

Source : Enertime ; 1. Très Basse Teneur en Soufre ; 2. heure équivalent pleine puissance ; 3. La température des fumées en entrée d'échangeurs dépend de la taille des moteurs (entre 330 °C et 360 °C)

La capacité électrique d'un ORC représente 3 à 8% de la capacité électrique installée de la centrale

L'ORC peut être dimensionné à partir des caractéristiques de la centrale selon la logique suivante :

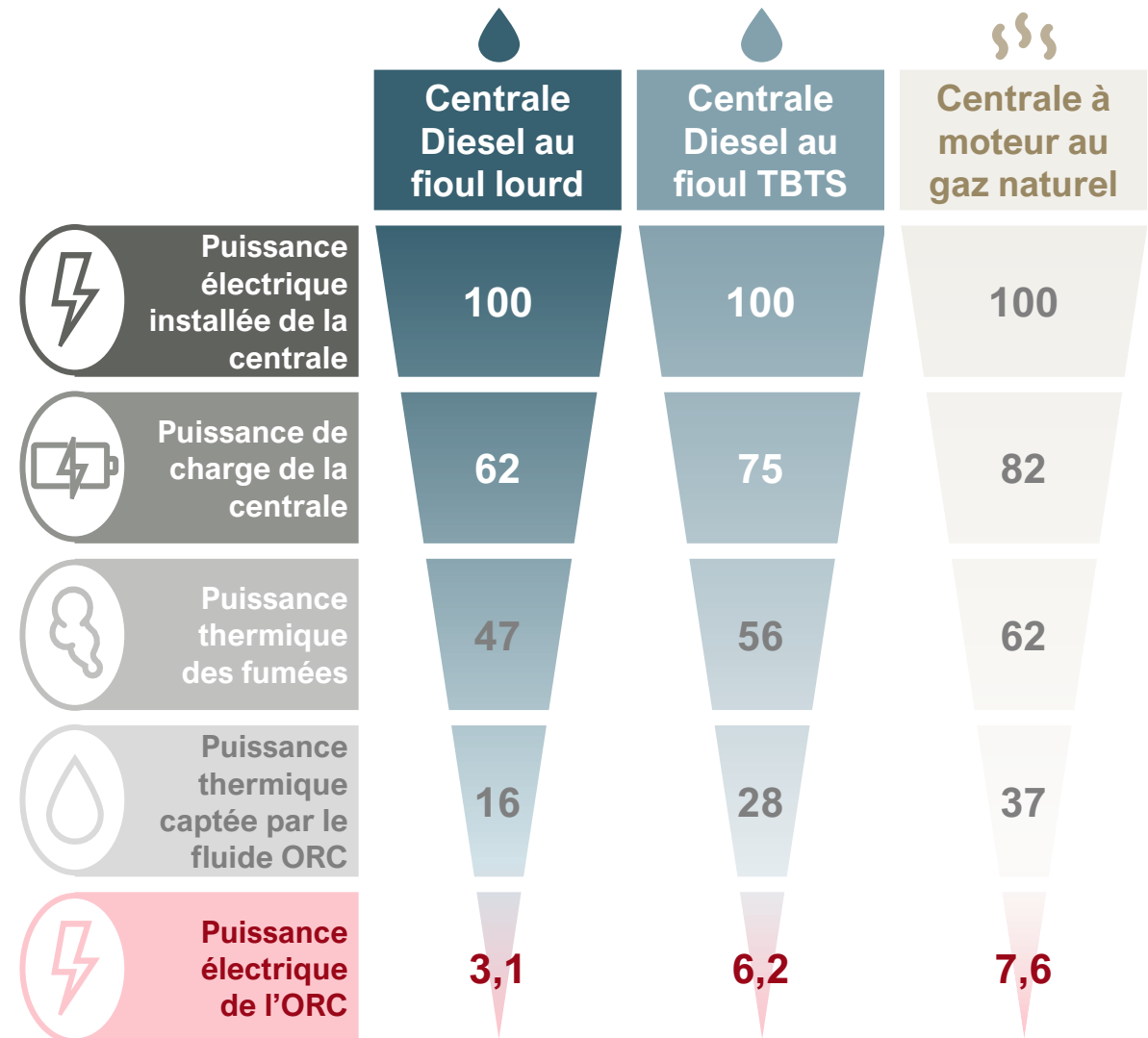
La puissance électrique installée de la centrale est le point de référence : base 100.

Le facteur de charge est le rapport entre l'énergie effectivement produite et l'énergie qui serait générée sur la même période par la centrale à sa puissance nominale. Ce facteur varie de 60% à 85% en fonction du mode d'exploitation.

La puissance thermique totale à valoriser par l'ORC (fumées et éventuellement circuit de refroidissement moteur¹) est fonction de la puissance de charge de la centrale. Dans une centrale à moteur, la **puissance dissipée dans les fumées peut être estimée à 75% de la puissance de charge de la centrale.**



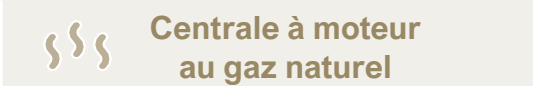






Selon le combustible utilisé et la qualité des fumées, le fluide organique de travail de l'ORC **recupère environ 35% de la puissance thermique des fumées dans le cas des fiouls lourds, 50% pour les fiouls TBTS ou les biocombustibles et 60% pour le gaz naturel.**

Le rendement net de l'ORC varie entre 19% et 23% essentiellement en fonction de la température de la source froide. Il est moins dépendant aux variations de température de la source chaude.



Source : Enertime ; 1. La différence entre les températures chaude et froide du circuit de refroidissement moteur étant relativement faible et bien que cela soit possible, il est souvent peu intéressant d'alimenter un ORC avec cette source de chaleur fatale. Nous retiendrons essentiellement les fumées comme source de chaleur fatale.

Selon les configurations, le temps de retour sur investissement d'une installation ORC varie de 3 à 8 ans

		 Centrale Diesel au fioul lourd	 Centrale Diesel au fioul TBTS	 Centrale à moteur au gaz naturel	
	DIMENSIONNEMENT DE L'ORC	MW _e	1,9	13,6	3,8
	PRODUCTION ANNUELLE D'ÉLECTRICITÉ PAR L'ORC	GWh	9,3	81,7	26,5
	INVESTISSEMENTS				
	ORC (y compris échangeurs) ¹	M€	6,6	28,3	10,1
	Pompage d'eau de mer	M€	-	1,0	-
	TOTAL	M€	6,6	29,3	10,1
	GAINS ANNUELS				
	Combustible	M€	0,9	8,2	1,8
	Quotas carbone	M€	0,1	1,1	0,2
	Charges d'exploitation ORC	M€	-0,1	-0,3	-0,2
	TOTAL	M€	0,9	9,0	1,8
	TEMPS DE RETOUR SUR INVESTISSEMENT	Années	7,7 ans	3,2 ans	5,8 ans
	RÉDUCTION DES ÉMISSIONS (CO ₂ , NO _x , SO _x , particules fines)	%	5,0 %	8,3 %	9,2 %

La réglementation de certains pays impose un seuil minimal d'efficacité énergétique des centrales thermiques. L'ajout d'un ORC permet alors de respecter ces directives et évite les pénalités correspondantes.

Source : Enertime ; 1. Le prix de l'ORC inclut les échangeurs sur source chaude et sur source froide, hors pompage d'eau de mer.

La transition vers des combustibles moins polluants et la hausse du prix des quotas carbone rendront plus attractif l'investissement dans les solutions ORC

Pour une même quantité d'électricité produite, un module ORC économise du combustible. **Plus le combustible est cher, plus l'installation d'un ORC est rentabilisée rapidement.**

Or, du fait de la pollution induite par l'utilisation des fiouls lourds, de nombreux pays exigent des exploitants de centrales l'utilisation de **combustibles moins polluants**, tels que les **fiouls à très basse teneur en soufre** ou les **biocombustibles**.

Ces modifications réglementaires **accroissent l'économie que procure l'installation d'un ORC et raccourcissent le temps de retour de son investissement.**



Ordres de grandeur : fioul lourd : 300 €/tonne, fioul TBTS : 400 €/tonne, biocombustible : 1 000 €/tonne.

L'évolution du prix des quotas carbone influe également sur le temps de retour sur investissement et le revenu annuel généré par un ORC.



Le prix des quotas carbone, qui s'échangeaient à 31 €/tonne en janvier 2021, pourrait atteindre 100 €/tonne en 2030 puis 300 €/tonne en 2050.¹ Dans ces conditions, **le temps de retour sur investissement serait significativement réduit.**

Source : 1. [Commission 2008, Centre d'Analyse Stratégique \(CAS\)](#)

Impact de l'évolution des combustibles sur le temps de retour et les gains annuels

		Fioul lourd	
		Fioul TBTS	Biocombustible
Evolution réglementaire : réduction SOx, NOx et particules fines			
	Impact sur le temps de retour	÷ 1.4	÷ 2.8
	Impact sur les économies réalisées	× 1,9	× 3,8

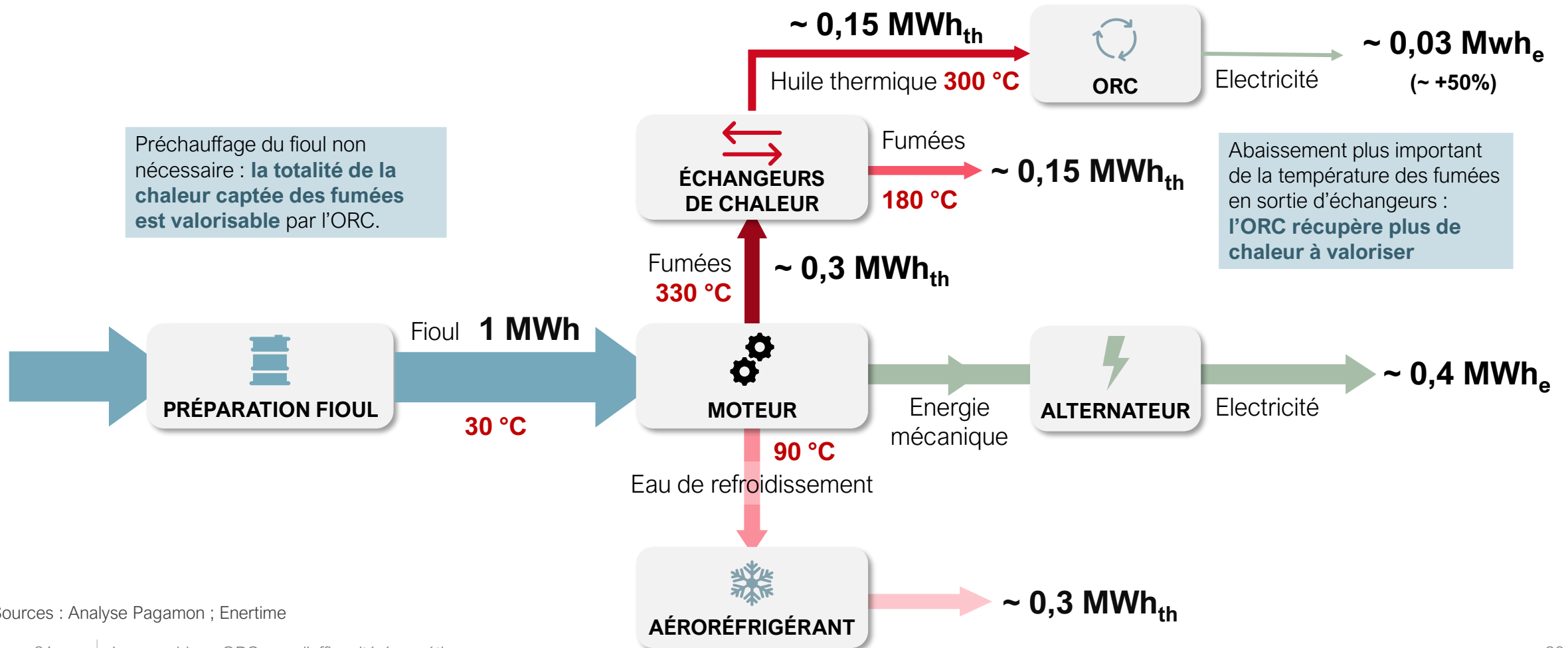
Impact de l'évolution des prix du quota carbone sur une centrale au fioul lourd


		2030	2050
		Quota carbone 100 €/t	Quota carbone 300 €/t
	Impact sur le temps de retour	÷ 1.3	÷ 2.2
	Impact sur les économies réalisées	× 1,3	× 2,2

Au-delà d'une économie en combustible de prix élevé, la configuration des centrales au fioul TBTS ou au biocombustible permet à l'ORC de valoriser plus de chaleur (+50%), ce qui améliore significativement l'équation économique



FLUX D'ÉNERGIE D'UNE CENTRALE DIESEL AU FIOUL TBTS OU AU BIOCOMBUSTIBLE





Le modèle ESCO tiers- financé pour l'installation et l'exploitation de machines ORC




Des solutions attractives pour
les exploitants et les
investisseurs

Le tiers-financement ESCO est un modèle performant pour la mise en œuvre de projets d'efficacité énergétique avec garantie d'économies d'énergie




Les **ESCO (Energy Services COmpany)** sont des sociétés de services énergétiques qui offrent aux clients la possibilité de financer leurs travaux et leurs réalisations d'efficacité énergétique dans de nombreuses applications avec des contrats adaptés à chaque situation.

Les ESCO offrent aux exploitants une **méthode efficace, flexible et rentable** pour améliorer leur performance énergétique, en s'appuyant sur des spécialistes de l'énergie et des tiers-financements responsables.

CARACTÉRISTIQUES DES ESCO

-  Services d'amélioration de l'efficacité énergétique
-  Rémunération sur le niveau d'économies réalisées
-  Investissements financés par des tiers

TYPES DE CONTRAT & APPLICATIONS USUELLES

	Contrat de performance énergétique (CPE)	Mesures d'isolation thermique des bâtiments privés ou publics
	Contrat de location opérationnelle d'équipement (lease)	Mise en place de systèmes de comptage intelligents
	Power Purchase Agreement (PPA)	Valorisation de chaleur fatale (industries écono-intensives, centrales à moteur...)

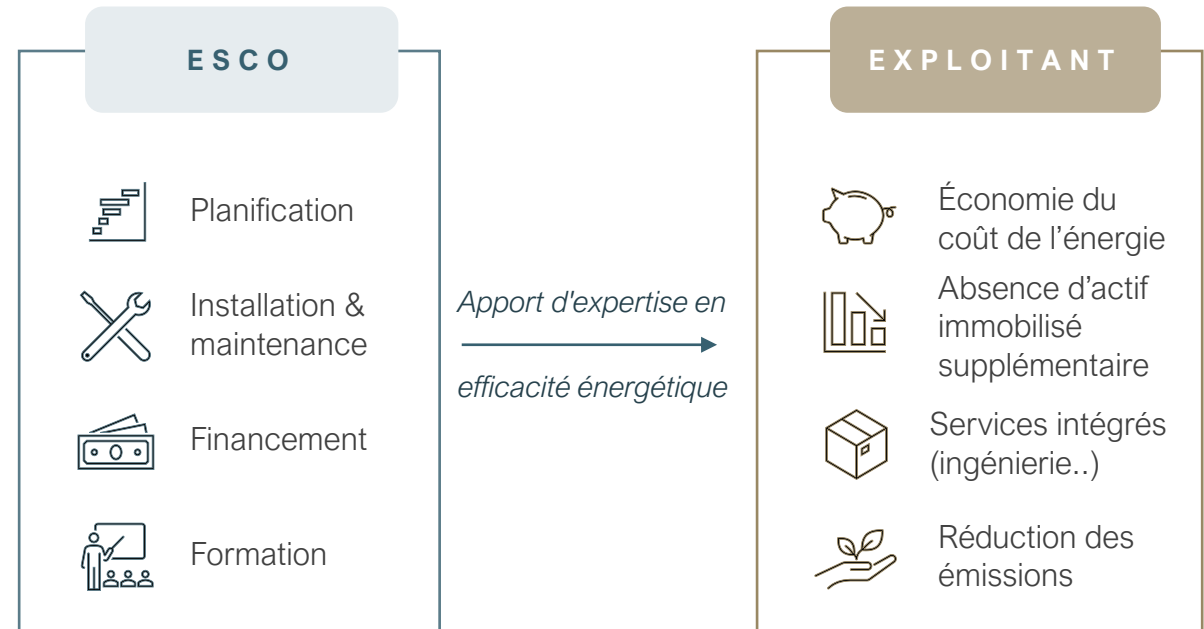
Dans le cas des installations ORC, les ESCO utilisent le plus souvent :

- un montage **Corporate PPA** dans lequel l'entreprise cliente met à disposition un espace pour produire de l'énergie décarbonée et s'engage à racheter l'électricité / chaleur produite sur une période définie
- un montage **Merchant Plant PPA** dans lequel la production d'électricité alimente le réseau général via un agrégateur d'énergie.

Le modèle ESCO de tiers-investissement est particulièrement pertinent pour les installations nécessitant des investissements importants telles que les ORC

L'ESCO intègre dans un contrat unique l'ensemble des **services nécessaires au projet et organise son financement**. L'ESCO assume les risques et garantit des économies sur une période définie avec le client pour assurer la rentabilité du projet.

Les économies d'énergie réalisées permettent de **rembourser les investissements initiaux** dans la durée décidée entre l'ESCO et son client de manière à assurer la rentabilité du projet.

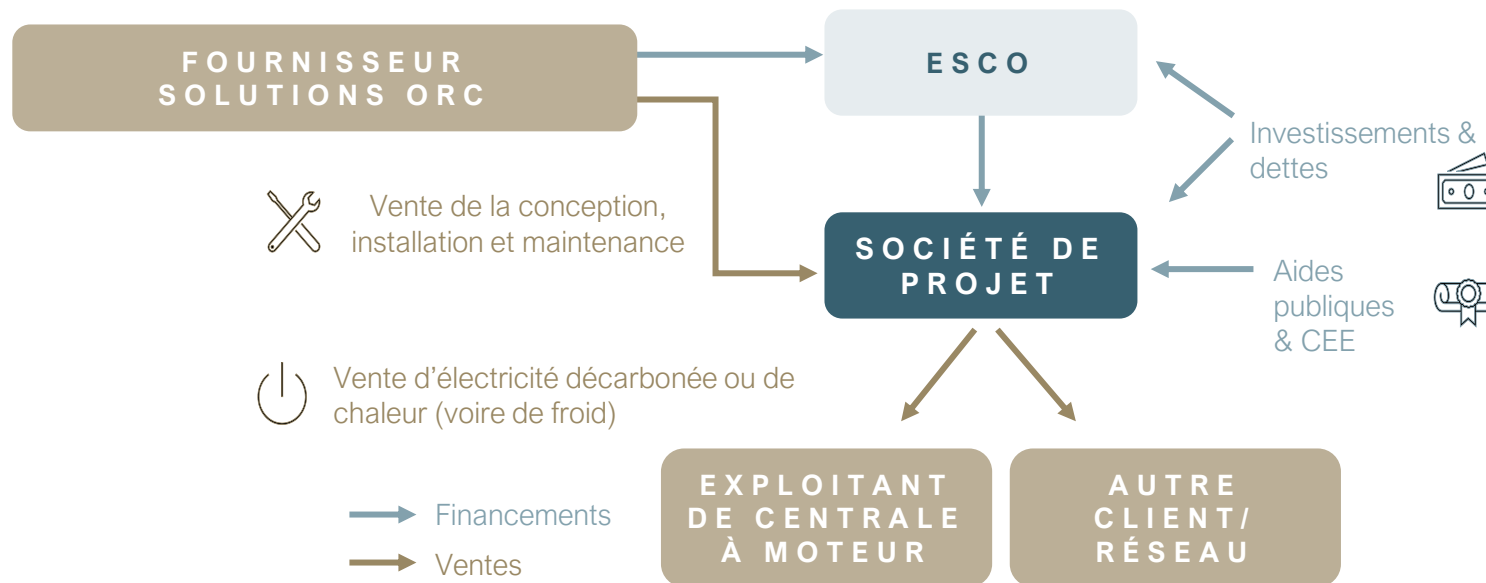


L'installation d'un système ORC pour améliorer l'efficacité énergétique d'une centrale à moteur nécessite un investissement de plusieurs millions d'euros. De ce fait, **le choix d'un modèle de tiers-investissement devient alors très intéressant** à la fois pour l'ESCO et pour l'exploitant de la centrale.

Le tiers-investissement dans un projet d'efficacité énergétique nécessite un montage financier spécifique entre l'ESCO et une Société de projet

Pour chaque installation de solution d'efficacité énergétique, l'ESCO initie une Société de projet¹. Le fournisseur de solution d'efficacité énergétique vend sa solution et ses services à cette société de projet. Pour financer ces investissements, l'ESCO et sa société de projet s'appuient sur des tiers :

- Financements en capitaux propres auprès de fonds d'investissement, d'investisseurs privés ou de banques d'investissement
- Financements en dette auprès de la BEI, de banques commerciales ou de fonds de dette spécialisés
- Dispositifs de subventions et aides publiques



La Société de projet remplit 4 fonctions :

- ✓ Montage du projet
- ✓ Recherche de financements externes
- ✓ Gestion des installations
- ✓ Revente d'électricité

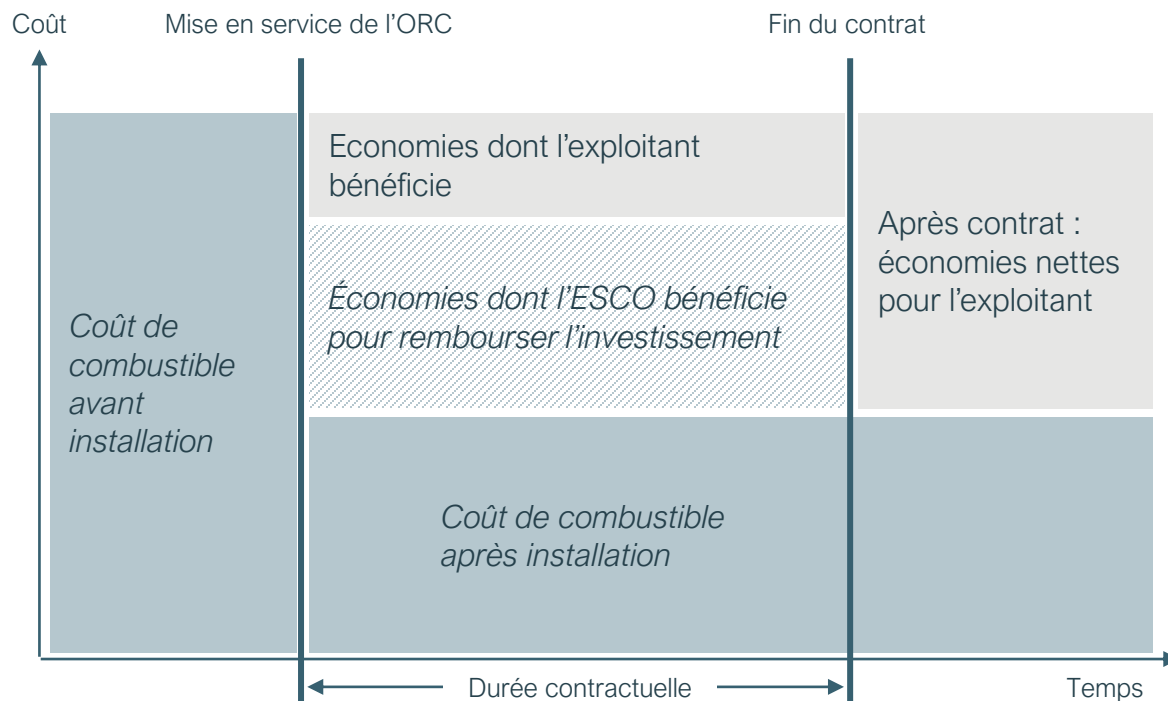
L'intérêt d'utiliser une Société de projet distincte pour chaque projet est de diminuer le risque que l'ESCO devienne trop importante, ce qui aurait pour effet de rendre les financements et les subventions plus délicats à obtenir, en particulier les subventions d'origine et à objectifs locaux.

1. Aussi appelée SPV pour *Special Purpose Vehicle*

Le mécanisme de tiers-financement assure des économies pour l'exploitant et une rentabilité pour l'ESCO et la Société de projet sur la durée du contrat

Avec l'installation d'un ORC sur une centrale à moteur, l'ESCO et la Société de projet remboursent les investisseurs grâce à la vente d'électricité à l'exploitant à **un prix attractif d'environ 80-90 €/MWh_e, c'est-à-dire moins de la moitié du coût de production de l'électricité par la centrale elle-même**. Les économies d'énergie réalisées par l'exploitant lui permettent par exemple d'assurer à moindre coût l'autoconsommation électrique de la centrale.

Partage des économies réalisées : schéma de principe



CHIFFRES CLÉS

POUR L'INSTALLATION D'UN ORC
EN RÉCUPÉRATION DE CHALEUR FATALE



- ✓ Economies pour l'exploitant de la centrale : 0,5 à 1,5 M€ pendant le contrat
- ✓ Temps de retour sur investissement pour la Société de projet : 7 à 10 ans¹
- ✓ Taux de rentabilité interne pour les investisseurs : 10% à 15% par an

MODÈLE AVEC « TUNNEL DE COMPENSATION »
POUR LA LIVRAISON DE CHALEUR
EN ENTRÉE DE L'ORC



Si l'exploitant **livre plus de chaleur que le plafond**, un **bonus** est calculé chaque mois



Niveau nominal de livraison de chaleur, fixé avec l'exploitant lors de la conception de l'ORC (en MWh_{th}/mois ou Nm³/mois)



Si l'exploitant **livre moins de chaleur que le plancher**, un **malus** est calculé chaque mois

1. Dans ce cas, l'exploitant de la centrale n'investit pas dans les installations ORC : ce temps de retour de 7-10 ans concerne la Société de projet et ses investisseurs tiers

En France, les ESCO et Sociétés de projet peuvent obtenir des subventions importantes rendant l'investissement encore plus attractif

Pour les ESCO et les Sociétés de projet, la rentabilité des projets de performance énergétique doit évidemment être évaluée au regard **des prix de l'énergie et des quotas de CO₂**.

Mais il existe également de nombreux **mécanismes de soutien** permettant d'améliorer le temps de retour sur investissement. En complément aux fonds d'infrastructures visant un positionnement RSE à des taux d'intérêt bas, les ESCO et Sociétés de projet peuvent aussi faire appel à des mécanismes d'aides publiques ou des dispositifs de subventions prenant plusieurs formes.

SOUTIENS ACTIONNABLES POUR FACILITER LE FINANCEMENT

- Le fond chaleur de l'ADEME
- L'appel à projet IndusEE dans le cadre du Plan de Relance 2020
- Les prêts de la banque européenne d'investissement (BEI)
- Les aides du fonds européen de développement régional (FEDER)
- Les subsides locaux et régionaux
- Les obligés via le dispositif des certificats d'économies d'énergie (CEE)



Le modèle de tiers-investissement offre de nombreux avantages à la fois aux exploitants de centrales et aux investisseurs sur projet

AVANTAGES POUR LES EXPLOITANTS



Accroissement de l'efficacité énergétique en **diminuant la consommation de combustible et les coûts d'exploitation.**



Installations à haute valeur ajoutée sans que l'exploitant n'ait à investir dans le projet, l'opération n'apparaît pas comme un actif dans son bilan.



Prestation de services intégrée, sans mobilisation de savoir-faire interne ou d'expertise externe nécessaires au projet. L'exploitant peut alors se concentrer sur son cœur de métier.



Contribution à la réduction de l'impact environnemental avec une baisse des émissions de GES et de polluants pour répondre aux enjeux RSE de l'exploitant, renforcer son image ou remplir ses obligations sur la trajectoire du développement durable.

AVANTAGES POUR LES INVESTISSEURS



Rentabilité forte et durable assurée par le positionnement des ORC sur la récupération de chaleur fatale (TRI de 10% à 15%, ROI en 7 à 10 ans suivant les projets). La « compensation tunnel » garantit les revenus en cas de variation de la production de la chaleur à valoriser.



Conditions de contrat établies pour **couvrir le risque financier des investisseurs**, notamment en cas de résiliation.



Solution clé en main où l'ESCO prend en charge la coordination de l'ensemble des acteurs impliqués dans la mise en œuvre du projet.



Réponse aux enjeux de société, prise de conscience environnementale et promotion de l'efficacité énergétique.

Dans le cas des ZNI françaises, le marché de l'électricité en tant qu'utilité régulée implique une adaptation du financement de l'efficacité énergétique

SPÉCIFICITÉ DE LA PRODUCTION D'ÉLECTRICITÉ DANS LES ZNI

Les **zones non interconnectées (ZNI)** sont les territoires français non raccordés au réseau d'électricité continental. Elles regroupent la Corse et l'Outre-Mer. **La contribution au service public de l'électricité (CSPE)**, collectée auprès des consommateurs (non-industriels) d'électricité, permet de compenser leurs coûts de production élevés. Ainsi les consommateurs en ZNI payent l'électricité à un prix similaire à celui des continentaux.¹

Les solutions d'efficacité énergétique en ZNI représentent alors **un levier complémentaire de réduction du coût supporté par le consommateur et/ou le contribuable**.

Dans les ZNI, la production d'électricité suit un modèle d'utilité régulée. Un mécanisme géré par la **Commission de Régulation de l'Énergie (CRE)**, soutient les exploitants de centrale en finançant de 7 à 11% de leurs investissements (capex) et en couvrant complètement leurs coûts d'exploitation (opex), combustible compris. Mais de ce fait, **les producteurs d'électricité en ZNI sont peu incités aux économies de combustible**.

La **programmation pluriannuelle de l'énergie (PPE)** pilote la stratégie de transition énergétique de la France. Pour bénéficier des dispositifs de la CRE, l'intégration des solutions ORC dans les plans PPE spécifiques des ZNI est un prérequis.

ADAPTATION DU MODÈLE ESCO DANS LE CAS PARTICULIER DES UTILITÉS RÉGULÉES

Pour inciter à l'installation d'ORC au service de l'efficacité énergétique en tenant compte de la régulation, un modèle économique de valorisation de chaleur fatale appuyé par **une obligation de rachat d'énergie par la CRE** apparaît alors comme une solution adaptée.

Un exemple comparable est celui de l'équipement d'un site de détente de gaz exploité par GRTgaz, filiale du groupe ENGIE.² L'énergie du gaz naturel comprimé est récupérée par détente à travers une turbine couplée à un alternateur. L'électricité produite est ensuite vendue sur le réseau.



Sources : 1. [Publication CRE, La transition énergétique dans les ZNI, 2020](#) ; 2. [Le projet TENORE entre GRTgaz et Enertime, 2018](#)

La revente d'électricité sur le réseau régulé, une alternative au modèle ESCO tiers-financé, pour s'adapter aux spécificités des ZNI

Le modèle ESCO pour l'installation d'ORC, entièrement financée par des tiers, garantit des économies d'énergie à l'exploitant mais ne prend pas en considération les spécificités du modèle des utilités régulées des ZNI. Pour rendre le modèle ESCO plus attractif pour les exploitants de centrale, une solution serait de positionner l'ESCO en tant que fournisseur d'électricité sur le réseau avec tarif réglementé.

ESCO EN PRODUCTEUR D'ÉLECTRICITÉ

Par exemple dans le cas des ZNI où opèrent EDF PEI/SEI, EEWf ou encore EDM, l'exploitant de la centrale investit dans les échangeurs pour capter la chaleur fatale. Afin de rembourser l'exploitation des échangeurs, cette chaleur est ensuite vendue par l'exploitant ou par la CRE à l'ESCO. L'ORC installé par l'ESCO valorise cette chaleur en électricité pour alimenter le réseau général via l'agrégateur concerné. L'ESCO négocie le tarif de rachat auprès de la CRE et se positionne en producteur d'électricité décarbonée sur le réseau régulé.



AVANTAGES POUR L'EXPLOITANT

- ✓ ***Pas d'engagement financier, accroissement des actifs immobilisés limité aux échangeurs***
- ✓ ***Une vente de chaleur qui compense les coûts d'exploitation des échangeurs***
- ✓ ***Une allocation de la CRE pour l'investissement dans les échangeurs***

Chaque MWh produit grâce à un ORC doit être valorisé au coût marginal de production de ce MWh par la centrale – essentiellement le coût du combustible. De ce fait, la transition vers des combustibles moins émetteurs de GES (biocombustible) et/ou moins polluants (fioul TBTS) mais plus onéreux, augmentera le niveau des économies réalisées grâce à l'ORC, rendant ainsi le **modèle ESCO en tiers-investissement encore plus attractif** pour l'ensemble des acteurs.

Le soutien à l'installation d'ORC dans les centrales à moteur serait un signal fort pour la réduction de l'empreinte carbone tout en maintenant un coût de production compétitif

La valorisation de la chaleur fatale des centrales à moteur génère une électricité décarbonée au même titre que l'éolien ou le solaire. De plus, les ORC présentent un coût de production très compétitif vis-à-vis de ces énergies renouvelables à production intermittente.^{1,2}

Comparatif des coûts de production entre ORC, Eolien et Solaire dans les ZNI :

ORC
(piloteable)
80-90 €/MWh

<

Eolien
(intermittent)
100-140 €/MWh

<

Solaire
(intermittent)
110-200 €/MWh

€

3 FACTEURS VONT ACCÉLÉRER L'ATTRACTIVITÉ DES SOLUTIONS ORC



Électrification de la société,
hausse de la « taxation » carbone



Obligations environnementales
de changement de combustible



Prise de conscience
environnementale des entreprises

Dans un futur proche, l'installation de modules ORC pour valoriser la chaleur fatale des centrales à moteur répondra aux objectifs des exploitants, des investisseurs et des pouvoirs publics sur le plan économique comme environnemental.

Sources : 1. [Rapport sur les coûts des énergies renouvelables, ADEME 2016](#) ; 2. Cours des comptes / CRE / Syndicat des énergies renouvelables.

Le déploiement par les pouvoirs publics d'une relance industrielle verte serait une opportunité pour accélérer l'installation d'ORC au service de l'efficacité énergétique



INCITATIONS PUBLIQUES

La loi de transition énergétique de 2015 pour la croissance verte a généré des incitations publiques qui ont favorisé les investissements dans l'éolien et le solaire. **Des mécanismes similaires pourraient être déployés afin de favoriser l'investissement industriel dans l'efficacité énergétique.** Les subventions et aides publiques via des appels à projet – tels que IndusEE de l'ADEME – sont à encourager pour soutenir l'attractivité du marché de l'efficacité énergétique.

Enfin, même si le mécanisme des CEE ne s'applique pas aux centrales thermiques, celles-ci devraient s'engager dans l'effort d'efficacité énergétique.



RÉGLEMENTATIONS

Le mécanisme européen de quotas carbone peut également inciter les industriels à mettre en œuvre des mesures d'efficacité énergétique. **L'augmentation de la taxe carbone prévue dans les années à venir rendra les solutions d'efficacité énergétique plus attractives pour les industriels.** Cela sera renforcé par le caractère peu délocalisable de la production d'électricité, non-sujette de ce fait aux allocations de quotas carbone gratuits.

La transition vers des combustibles moins polluants et moins émetteurs de GES devrait **faire l'objet d'obligations environnementales communes** au niveau européen plutôt que d'être laissé à l'appréciation au cas par cas.



PATRIOTISME ÉCONOMIQUE

Le soutien d'une filière industrielle d'efficacité énergétique serait largement renforcé via des engagements de commandes sur le long terme. **Certaines technologies font aujourd'hui l'objet d'un savoir-faire français reconnu et possèdent un potentiel de développement important – y compris à l'export. Elles méritent d'être soutenues.** En accentuant leurs collaborations avec le tissu national de PME innovantes, les grands acteurs français de l'énergie auront évidemment un rôle clé à jouer dans le développement de cette filière.

En outre, peu consommatrices en béton ou en terres rares, les technologies ORC paraissent apporter une contribution tant à l'enjeu de l'efficacité énergétique qu'à celui de la réindustrialisation du territoire.



Pagamon tient à remercier sincèrement l'ensemble des personnes qui ont contribué par leur temps et leur expertise à la réalisation de cette étude



Bibliographie

La technologie ORC pour valoriser la chaleur fatale des centrales à moteur / intérêt économique et environnemental :

Emissions de GES en 2010 : GIEC, 2014, https://archive.ipcc.ch/pdf/assessment-report/ar5/wg3/ipcc_wg3_ar5_summary-for-policymakers.pdf

Perspectives des émissions mondiales : Carbone4, 2020, 2019, <http://www.carbone4.com/2019-stagnation-emissions-mondiales/>

A World Overview of the Organic Rankine Cycle Market : Thomas Tartière, 2017, <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1876610217340286>

La chaleur fatale : ADEME, 2017, https://www.ademe.fr/sites/default/files/assets/documents/chaleur_fatale-8821-2018-06_pdf.pdf

Listes des centrales thermiques : Global Energy Observatory, 2018, <http://globalenergyobservatory.org/list.php?db=PowerPlants&type=Oil>

Liste des centrales thermiques aux USA : EIA, 2021, U.S. Preliminary Monthly Electric Generator Inventory, <https://www.eia.gov/electricity/data/eia860m/>

Le contenu en CO₂ du kWh : Equilibre des Energies, 2019, <https://www.equilibredesenergies.org/12-10-2018-le-contenu-en-co2-du-kwh/>

Statistical Review of World Energy : BP, 2020, BP Statistical Review of World Energy 2020, <https://www.bp.com/content/dam/bp/business-sites/en/global/corporate/pdfs/energy-economics/statistical-review/bp-stats-review-2020-full-report.pdf>

Installed power generation capacity by source in the Stated Policies Scenario : IEA, 2020 Installed power generation capacity by source in the Stated Policies Scenario, 2000-2040 – IEA, <https://www.iea.org/data-and-statistics/charts/installed-power-generation-capacity-by-source-in-the-stated-policies-scenario-2000-2040>

Investment Requirements In the EU electricity sector up to 2050 : VGB, 2015, SAB Discussion Paper on Investment requirements 2015, https://www.vgb.org/en/investment_requirements_EU_2050.html?dfid=73527

Emissions from diesel generation in Small Island Power Systems : Eurelectric, 2011, EURELECTRIC – Emissions from diesel generation in Small Island Power Systems - Recommendations for the revision of the Gothenburg protocol, https://unece.org/fileadmin/DAM/env/documents/2011/eb/wg5/WGSR49/Informal%20docs/EURELECTRIC-diesel_engines_and_Gothenburg_protocol-July_2011.pdf

Valeur du carbone à horizon 2030 et 2050 : Centre d'Analyse Stratégique n°16, 2009, http://archives.strategie.gouv.fr/cas/system/files/rapp_16_vtc_web.pdf

Marchés du carbone : Ministère de la transition Ecologique, 2021, <https://www.ecologie.gouv.fr/marches-du-carbone>

Emissions de CO₂ en fonction des combustibles : Ademe, 2020, https://www.bilans-ges.ademe.fr/documentation/UPLOAD_DOC_FR/index.htm?gaz.htm

L'industrie du raffinage et le devenir des fiouls lourds : Ineris, 2004, INERIS – L'industrie du raffinage et le devenir des fiouls lourds, <https://www.ineris.fr/sites/ineris.fr/files/contribution/Documents/fioul.pdf>

Bibliographie

Le modèle ESCO tiers-financé pour l'installation et l'exploitation de machines ORC :

PPA : Où en est-on en France ? : Orygeen, 2019, <https://www.orygeen.eu/docs-actus/livres-blancs/ppa-france/>

Appel à projets efficacité énergétique : France Relance, 2020, <https://www.entreprises.gouv.fr/files/files/secteurs-d-activite/industrie/decarbonation/appel-a-projets-efficacite-energetique-procedes-et-utilites-dans-l-industrie.pdf>

La chaleur fatale : Ademe, 2017, https://www.ademe.fr/sites/default/files/assets/documents/chaleur_fatale-8821-2018-06_pdf.pdf

Les acteurs, l'offre et le marché de l'efficacité énergétique à destination de l'industrie : Ministère de l'économie et des Finances, 2017, https://www.entreprises.gouv.fr/files/files/directions_services/etudes-et-statistiques/prospective/Industrie/2017-10-Rapport-pipame-efficacite-energetique.pdf

Dispositifs de financement alternatifs pour la rénovation énergétique du bâtiment : Global Chance, 2014, <http://www.global-chance.org/IMG/pdf/gc35p12-23.pdf>

ORC : Sia Partners, 2015, <https://www.sia-partners.com/fr/actualites-et-publications/de-nos-experts/les-modules-orc-avenir-dune-production-renouvelable>

Coûts des énergies renouvelables : Ministère de l'environnement, de l'Énergie et de la Mer, 2016, https://www.ademe.fr/sites/default/files/assets/documents/couts_energies_renouvelables_en_france_edition_2016.pdf

La modernisation du parc thermique en France : EDF, 2016, <https://www.edf.fr/groupe-edf/producteur-industriel/thermique/enjeux/modernisation-du-parc>

La contribution au service public de l'électricité (CSPE) : Ministère de l'économie et des Finances, 2018, <https://www.economie.gouv.fr/entreprises/contribution-service-public-electricite-cspe>

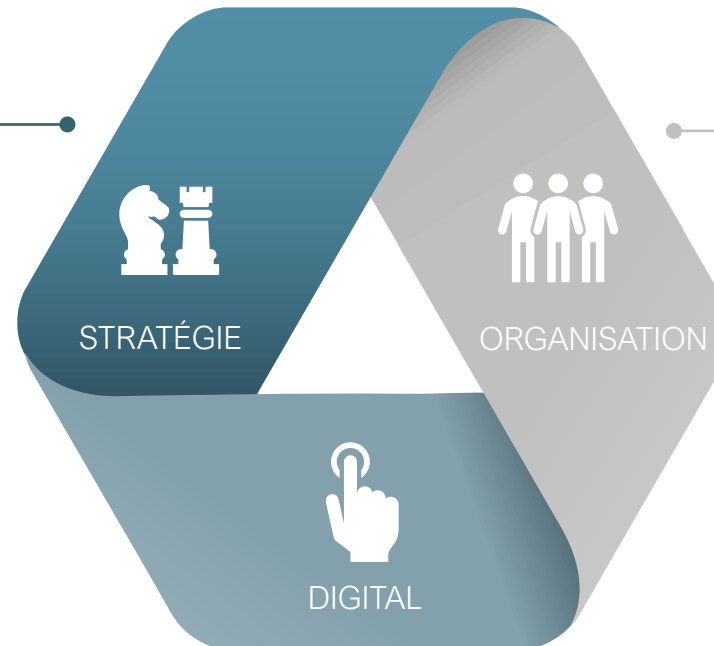
Transition énergétique dans les ZNI : CRE, 2020, <https://www.cre.fr/Transition-energetique-et-innovation-technologique/soutien-a-la-production/transition-energetique-dans-les-zni>

Le projet TENORE entre GRTgaz et Enertime : Communiqué de presse, 2018, https://www.enertime.com/sites/default/files/documents/2018/18_06_21_cp_enertime-grtgaz-projet_tenore_vdef.pdf

Pagamon aide les entreprises à structurer leur vision stratégique, à améliorer leur performance opérationnelle et à pérenniser le changement au sein de leur organisation

Conseil en Stratégie

Stratégie & Due Diligence
Marketing & Expérience Client
Innovation & Développement



Conseil en Organisation

Diagnostic des organisations
Transformation Agile
Conduite du changement
Gestion de projets complexes

Conseil en Digital

Transformation Digitale
Marketing Digital

A propos de **Pagamon**

Pagamon est un cabinet de conseil en stratégie et management fondé en 2013.

Fort de l'expérience acquise à travers plus de 160 missions réalisées au sein d'entreprises industrielles de premier plan, Pagamon permet à ses clients de préserver leur avantage concurrentiel, en créant de la valeur en amont du cycle de vie des produits et services.

Rendez nous visite sur **www.pagamon.com**

Pour plus d'informations **contactez**

Christophe Bildé – Associé et Fondateur

christophe.bilde@pagamon.com

+33 (0)6 16 96 12 64

Richard Dumas – Associé et Fondateur

richard.dumas@pagamon.com

+33 (0)6 60 98 82 48

Romain Friang – Manager Innovation & Développement

romain.friang@pagamon.com

+33 (0)6 85 67 73 58

