

APR IR RÉGION CENTRE VAL DE LOIRE AMIGO: ARGUMENTAIRE POUR LE DÉPLOIEMENT DE LA GÉOTHERMIE PROFONDE EN RÉGION CENTRE - VAL DE LOIRE

Séminaire du 17/09/2025, BRGM, Orléans



Programme du séminaire

Matinée (10h00 – 12h45)

1. Rappel des objectifs du projet, partenaires et chronogramme (10 min)

2. Présentation des premiers résultats du projet (~ 2h)

1. Présentation des éléments issus de l'analyse multi-acteurs/multicritères des entretiens réalisés
2. Aspects technico-économiques et environnementaux d'un projet de géothermie profonde
3. Les besoins de chaleur et la ressource en région Centre-Val de Loire (lien avec le projet d'inventaire géothermique national)
4. Retour d'expérience du forage géothermique de Melleray

3. Questions/échanges (30 min)

Pause déjeuner (12h45-14h)

4. Réflexion commune sur la co-construction de l'argumentaire (1h)

1. Objectifs du projet

- Projet de recherche cofinancé par la région Centre-Val de Loire (APR-IR 2023) qui a pour objectif de développer **un argumentaire à destination des collectivités locales et des acteurs de la région ayant des besoins importants de chaleur pour le recours à la géothermie profonde**
- **Méthodologie adoptée:**
 - **Identification des principaux acteurs** (collectivités, structures d'accompagnement, serristes et industriels)
 - **Interviews des acteurs sur :** les besoins de chaleur et sources d'énergie actuelles, les atouts et freins de la géothermie, les leviers potentiels (financiers/administratifs, modes de communication, formation/accompagnement, technico-économiques)
 - **Evaluation multi-acteurs et multicritères** sur la base de l'importance accordé aux différents arguments qui ressortent des différents discours et qui concernent les atouts, freins et leviers de la géothermie profonde
 - **Éléments de décision sur la base d'une analyse économique et environnementale** de la géothermie profonde en comparaison d'autres EnR (biomasse, solaire thermique)
 - **Evaluation du potentiel géothermique de la région CVL** avec la caractérisation de la ressource et le croisement avec les besoins identifiés
 - **Argumentaire de la géothermie profonde**

1. Partenaires du projet

BRGM (coordination): Virginie Hamm, Feninstoa Andriamasinoro, Alexis Allain, Pierre Durst

LEO: Xavier Galiègue, Moustapha Mounmemi

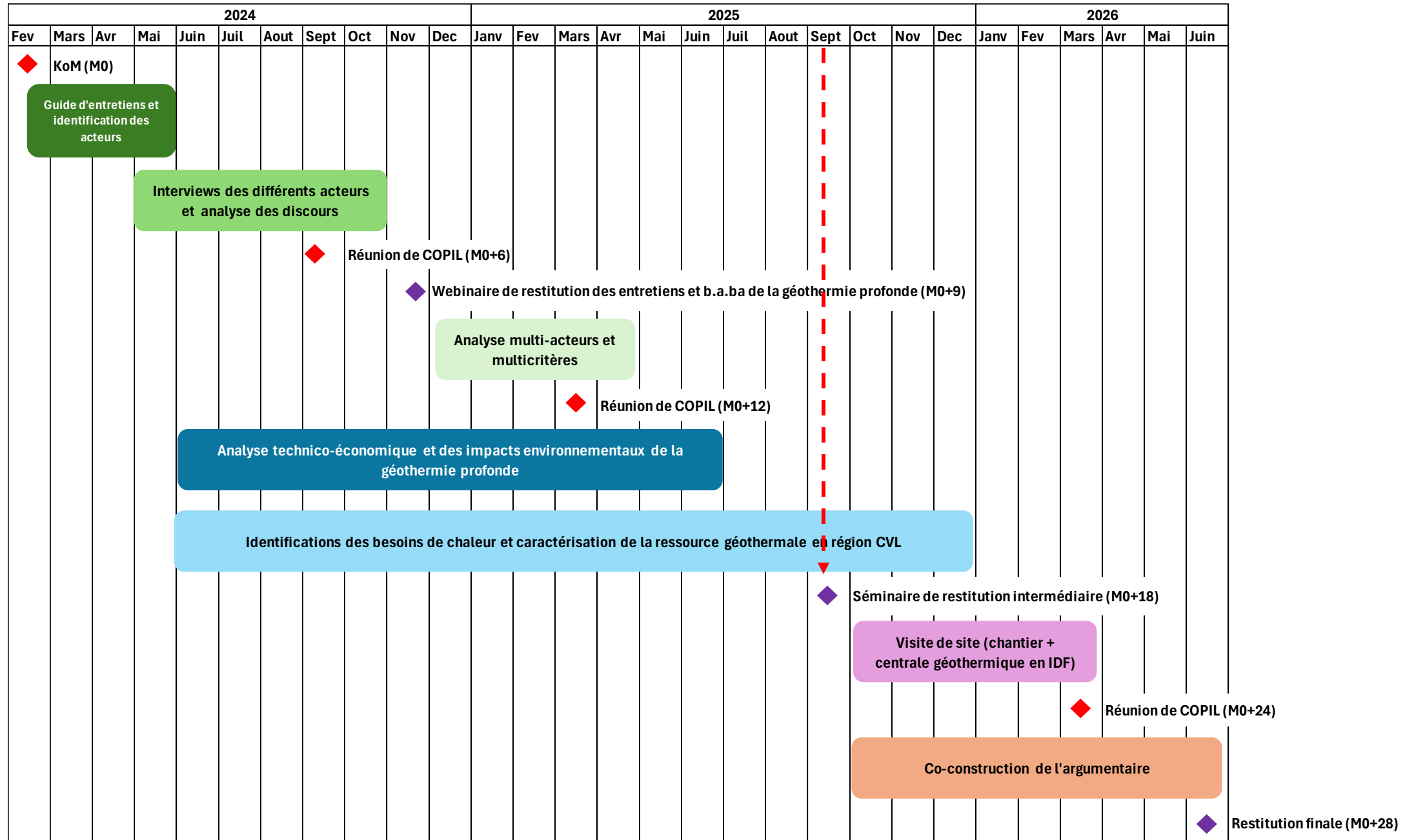
AFPG / CFG : Xavier Moch / Frederik Bugarel

AMORCE: Remi Beaulieu

AgreenTech Valley: Muriel Doucet

Chartres Métropole: Hervé Leroy

1. Chronogramme



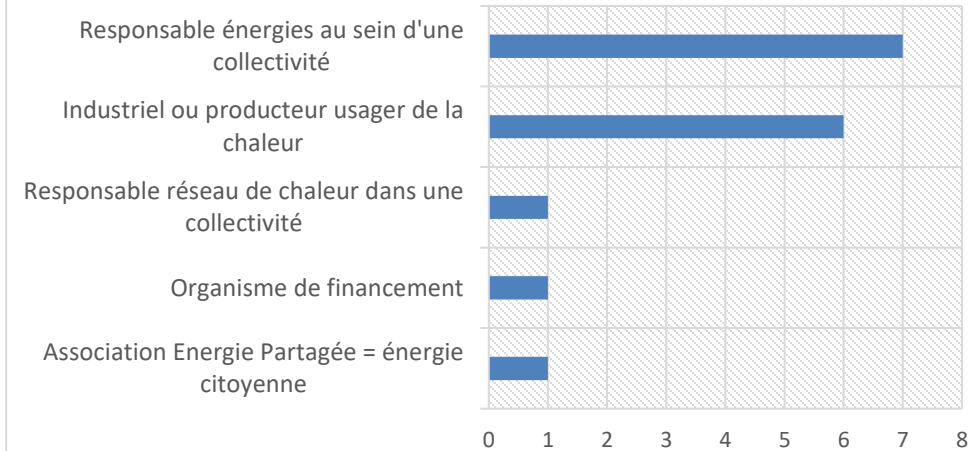
2.1 Analyse multicritères et multi-acteurs

- Identification **d'une soixantaine d'acteurs dont 34 interviewés dans le cadre du projet** entre mai et septembre 2024
 - 13 acteurs représentant des collectivités
 - 9 acteurs représentant des syndicats d'énergie ou organismes de financement
 - 12 acteurs représentant des entreprises ou serristes
- Présentation des résultats des entretiens sous la forme d'un **webinaire le 26/11/2024**
→ Projet AMIGO, Argumentaire pour le déploiement de la géothermie profonde en région Centre-Val de Loire : atelier de restitution des premiers résultats | Geothermies
- Envoi d'un questionnaire multichoix aux acteurs interviewés construit à partir **des différentes catégories d'arguments qui ressortent des entretiens individuels des acteurs**:
 - L'intérêt portée par leur structure à l'étude d'une solution de géothermie profonde pour répondre à leurs besoins de chaleur
 - L'importance accordé aux arguments identifiés comme des atouts, freins et leviers potentiels de la géothermie profonde
 - L'échelle et l'horizon temporel auxquels les acteurs considèrent leur usage de la chaleur
 - Les documents sur lesquels ils s'appuient pour la planification de leurs besoins
 - Les compétences extérieures mobilisées et domaines de compétence concernés

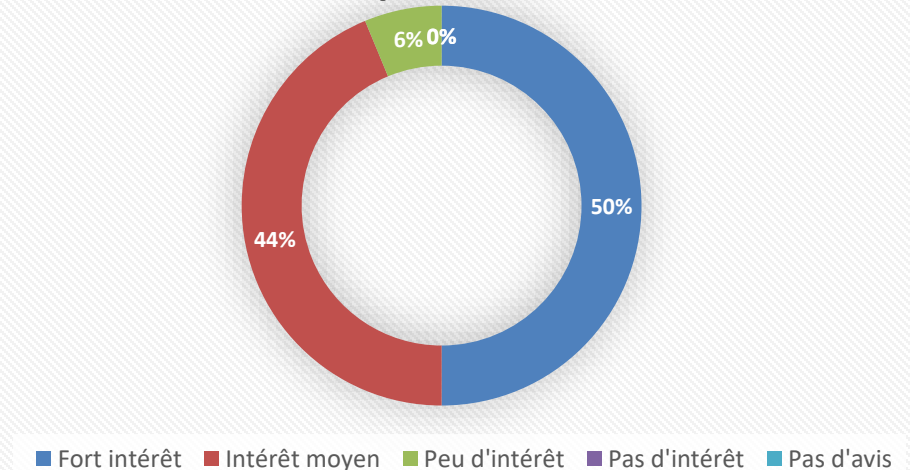
2.1 Analyse multicritères et multi-acteurs

- Fonction des acteurs ayant répondu au questionnaire :
- Réponse sur l'intérêt de leur structure à l'étude d'une solution de géothermie profonde pour répondre aux besoins de chaleur :

Fonction des répondants



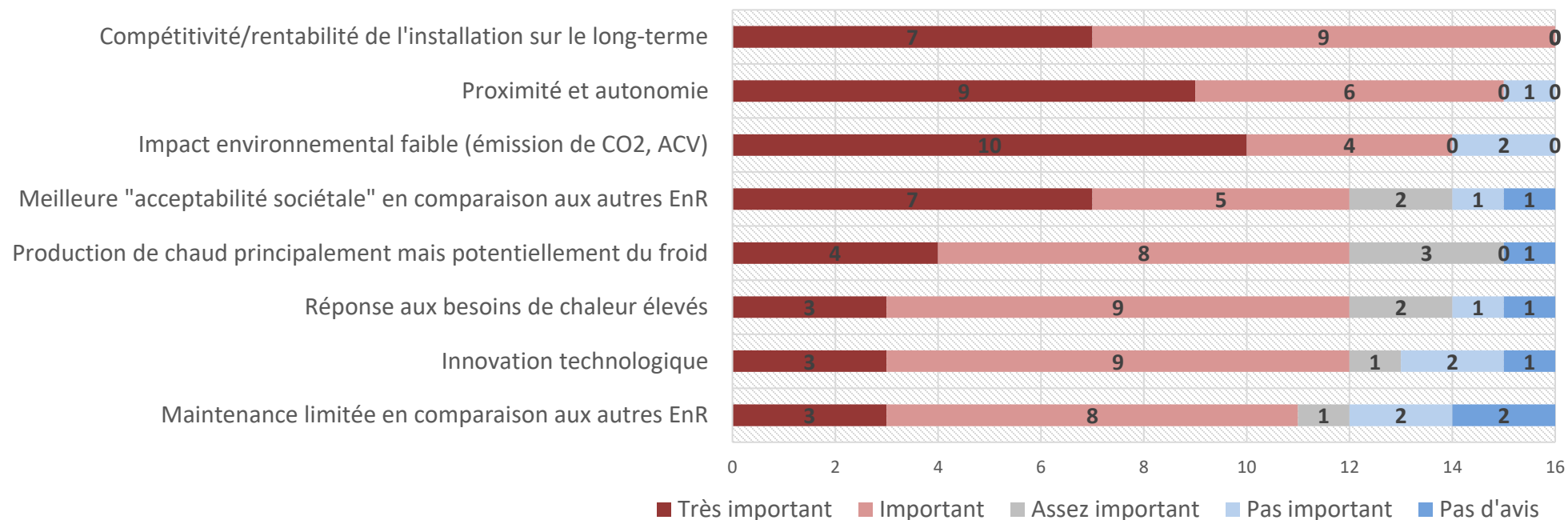
Intérêt d'une solution de géothermie profonde



2.1 Analyse multicritères et multi-acteurs

- Importance des arguments identifiés comme **des atouts** au développement de la géothermie profonde

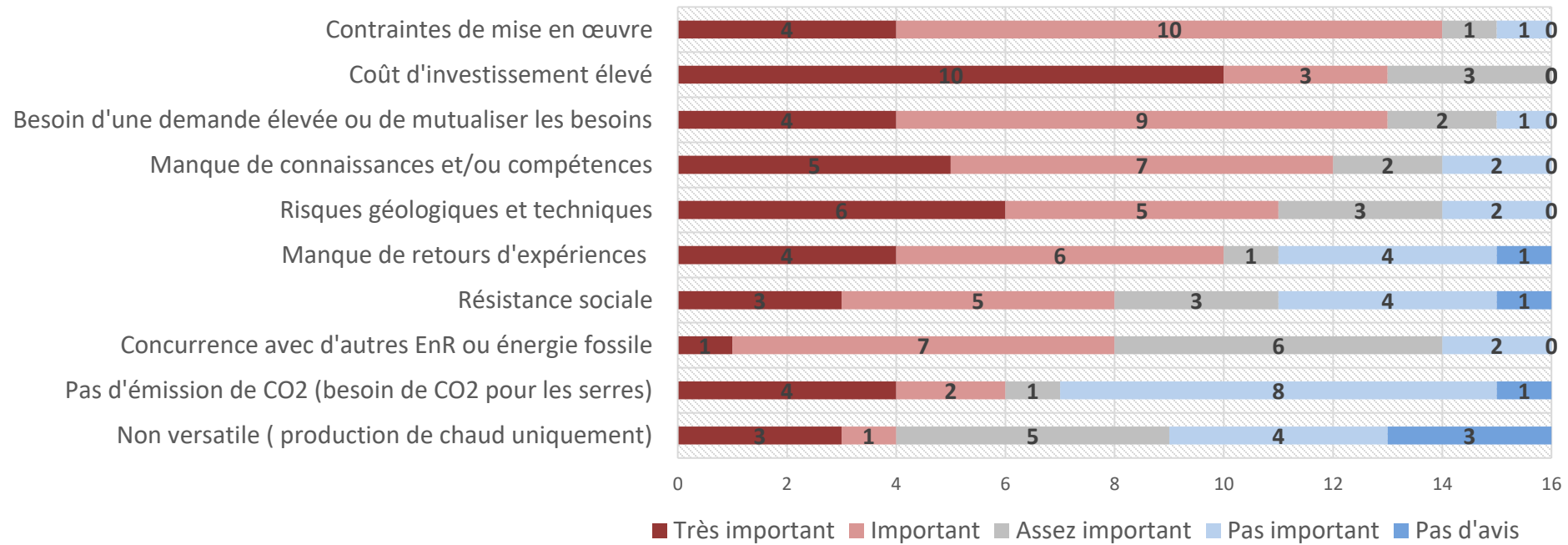
Arguments des acteurs vus comme des atouts de la géothermie profonde



2.1 Analyse multicritères et multi-acteurs

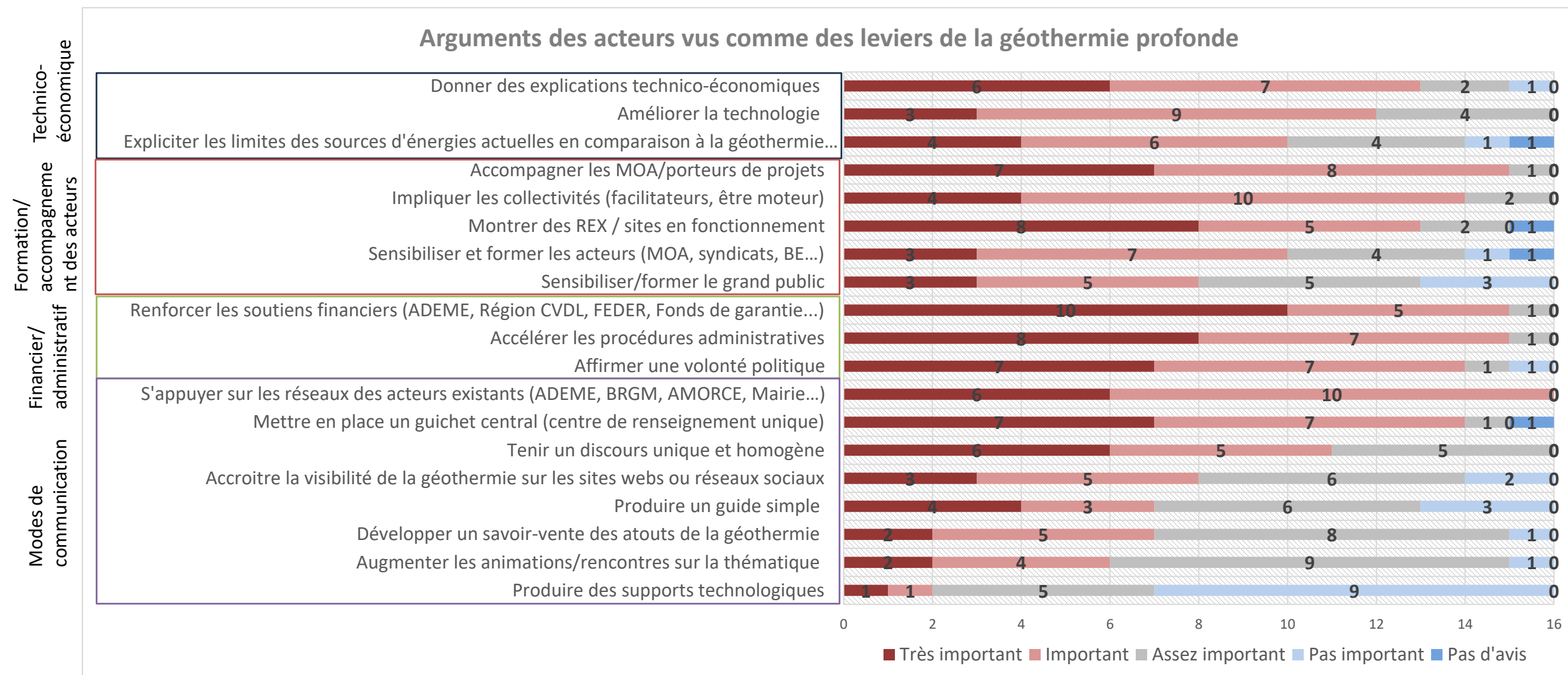
- Importance des arguments identifiés comme **des freins** au développement de la géothermie profonde

Arguments des acteurs vus comme des freins de la géothermie profonde



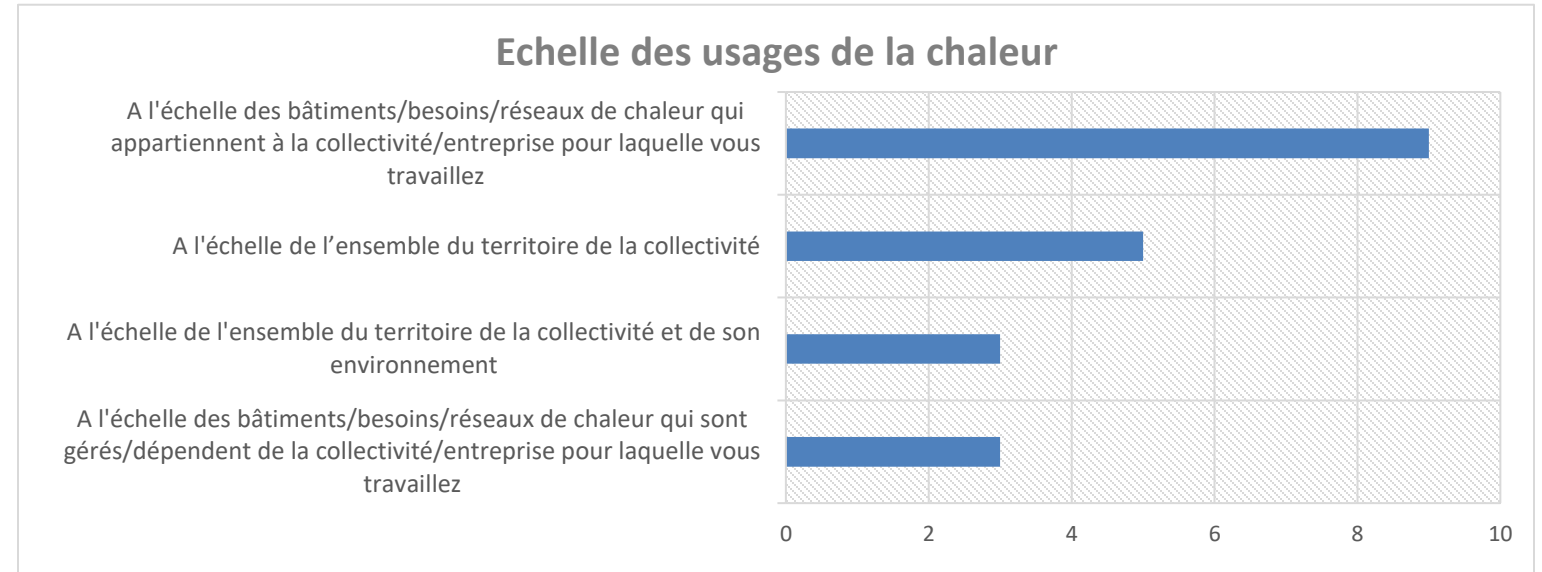
2.1 Analyse multicritères et multi-acteurs

- Importance des arguments identifiés comme **des leviers potentiels** au développement de la géothermie profonde

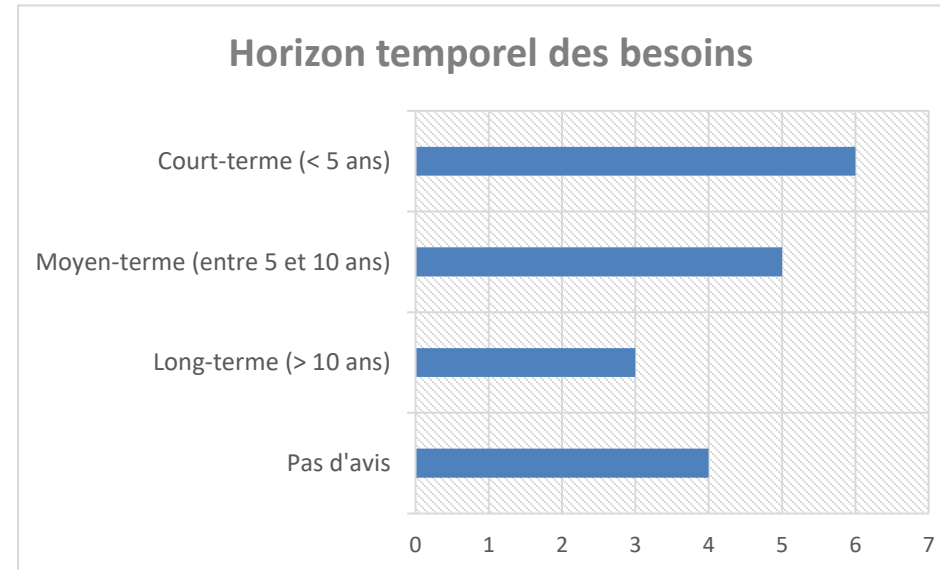


2.1 Analyse multicritères et multi-acteurs

- Echelle des usages de la chaleur

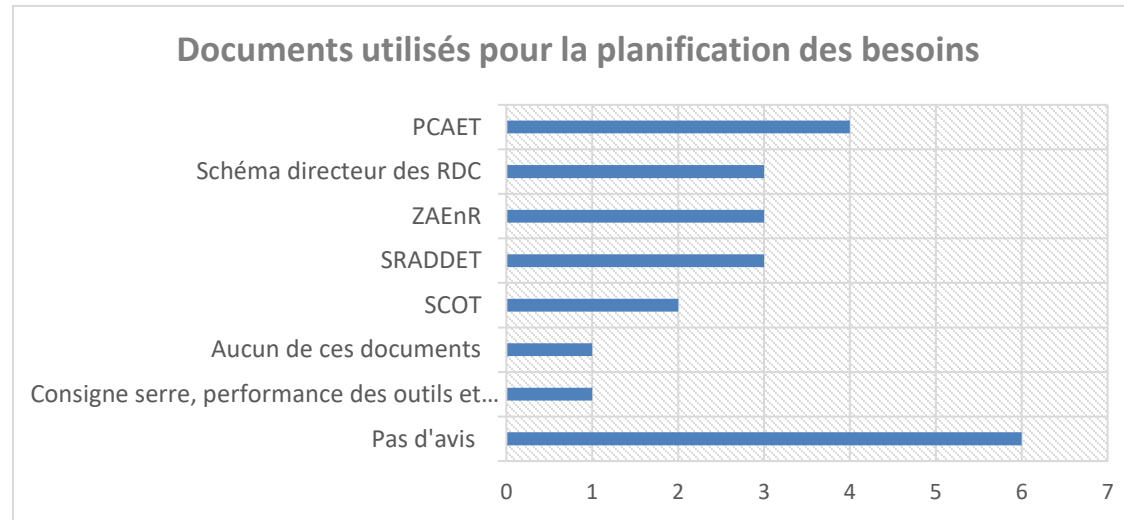


- Horizon temporel

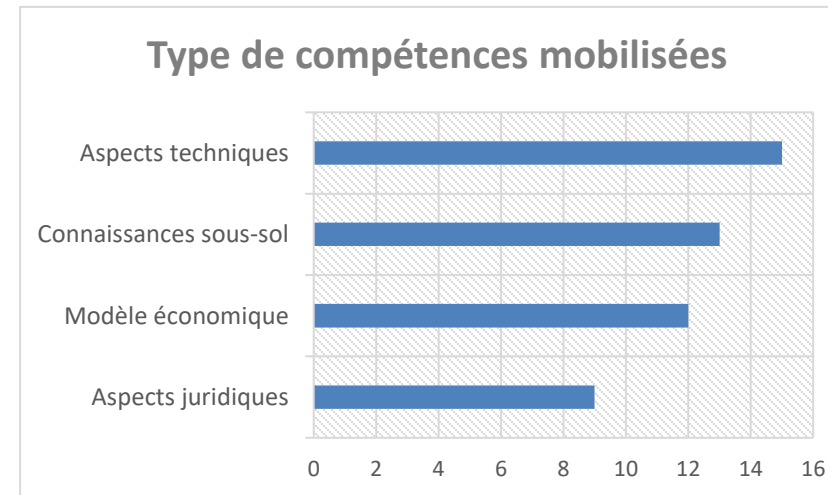
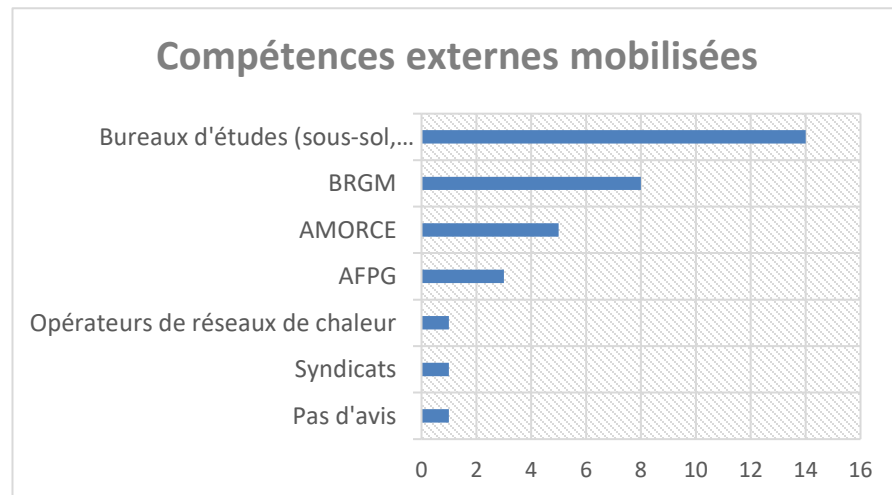


2.1 Analyse multicritères et multi-acteurs

- Documents utilisés pour la planification des besoins de chaleur



- Compétences externes mobilisées et domaines concernés



2.2 Analyses technico-économique et environnementale

Première partie:

Analyse technico-économique et financière du déploiement de la géothermie profonde

2.2 Analyse technico-économique

Objectifs: Evaluer la faisabilité du projet aussi bien sur le plan technique qu'économique, ce qui permet :

- D'anticiper les défis liés à sa mise en œuvre et d'optimiser les choix technologiques et financiers

Indicateurs technico-économiques et financiers:

- Le LCOE - Levelized Cost of Energy- Coût actualisé de l'énergie (€/MWh)
- La valeur actuelle nette (VAN)
- Le taux de rentabilité interne (TRI) et le temps de retour sur investissement (PP)

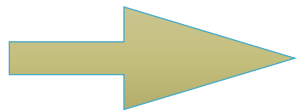
Sources des données:

- ADEME, AMORCE, CFG, ENGIE
- IRENA, AIE

2.2 Analyse technico-économique

Hypothèse 1: Prise en compte des études préliminaires de dérisking

- **Segment 1**– Projets présentant un risque faible (zone géologique et potentiel géothermique connus). Le coût du dérisking est évalué entre **50 k€** et **70 k€**
- **Segment 2** – Projets présentant un risque moyen (zone géologique connue mais potentiel géothermique peu connu). Dans ces zones, le coût du derisking est évalué entre **90 k€** et **140 k€**.
- **Segment 3** - Projets présentant un risque fort (zone géologique et potentiel géothermique mal connus). Dans ces zones, le coût du derisking est évalué entre **310K€** et **1170 k€**.



En région Centre-Val de Loire, on se situe sur du segment 2 ou 3 suivant la zone et la cible potentielle.

2.2 Analyse technico-économique

Hypothèse 2: CAPEX et OPEX - Les différents postes de dépenses

Hypothèses	
Phases	Composantes
Travaux de forage	Rig - Mob/démob/régie
	Levage
	Fluide de forage
	Contrôle des solides
	Evacuation des déblais
	Déviation
	Outils
	Equipements turbage
	Visssage
	Coupe tubages
	Cimentation
	Acidification
	Tête de puits
	GNR/ELEC
Travaux de surface doublet en acier	Equipements extérieurs et puits
	Equipements intérieurs en centrale géothermique
	Installation et fourniture de la boucle géothermale
Risque	Main d'œuvre
	Faible
	Moyen
	Fort
Assurance	SAF
PACs	Coût

OPEX DOUBLET DOGGER		
Catégories	Postes	Composantes
Coûts variables	Consommation	Fourniture d'électricité de pompage
		Fourniture d'inhibiteur de corrosion
		Fourniture électricité PACs
Coûts Fixes	Suivi et entretien courant	Suivi de la boucle géothermale
		Diagraphies réglementaires puits producteurs
		Diagraphies réglementaires puits injecteurs
		Filtres et échangeurs
		Conduite et petite maintenance de la boucle
		Contrat anti-éruption
		Cotisation fonds de garantie geothermie
		Maintenance PACs
	Gros entretien et renouvellement	Renouvellement (fourniture et manœuvre) pompe exhaure
		Renouvellement colonne d'exhaure
		Renouvellement des têtes de puits (adaptateurs+Vanne)
		Renouvellement ligne injection inhibiteur (TCTF)
		Renouvellement pomme d'injection (fourniture et main d'œuvre)
		Maintenances pomme d'injection (Garniture pomme-roulement moteur)
		Maintenances échangeurs et filtres
		Renouvellement variateur et transformateur élévateurs
		Maintenance variateur et transformateur élévateurs
		Renouvellement station et traitement
		Renouvellement robinetteries (hors têtes de puits), capteurs
		Maintenance capteurs/télégestion/conduites/robinetteries Inox 316
		Acidification douce des tubages et réservoirs sur les deux puits
		Curage mécanique et rechemisage complet du doublet

2.2 Analyse technico-économique

Hypothèse 3: Caractéristiques techniques d'un projet de géothermie profonde et comparaison avec les autres sources de chaleur EnR et chaudière gaz

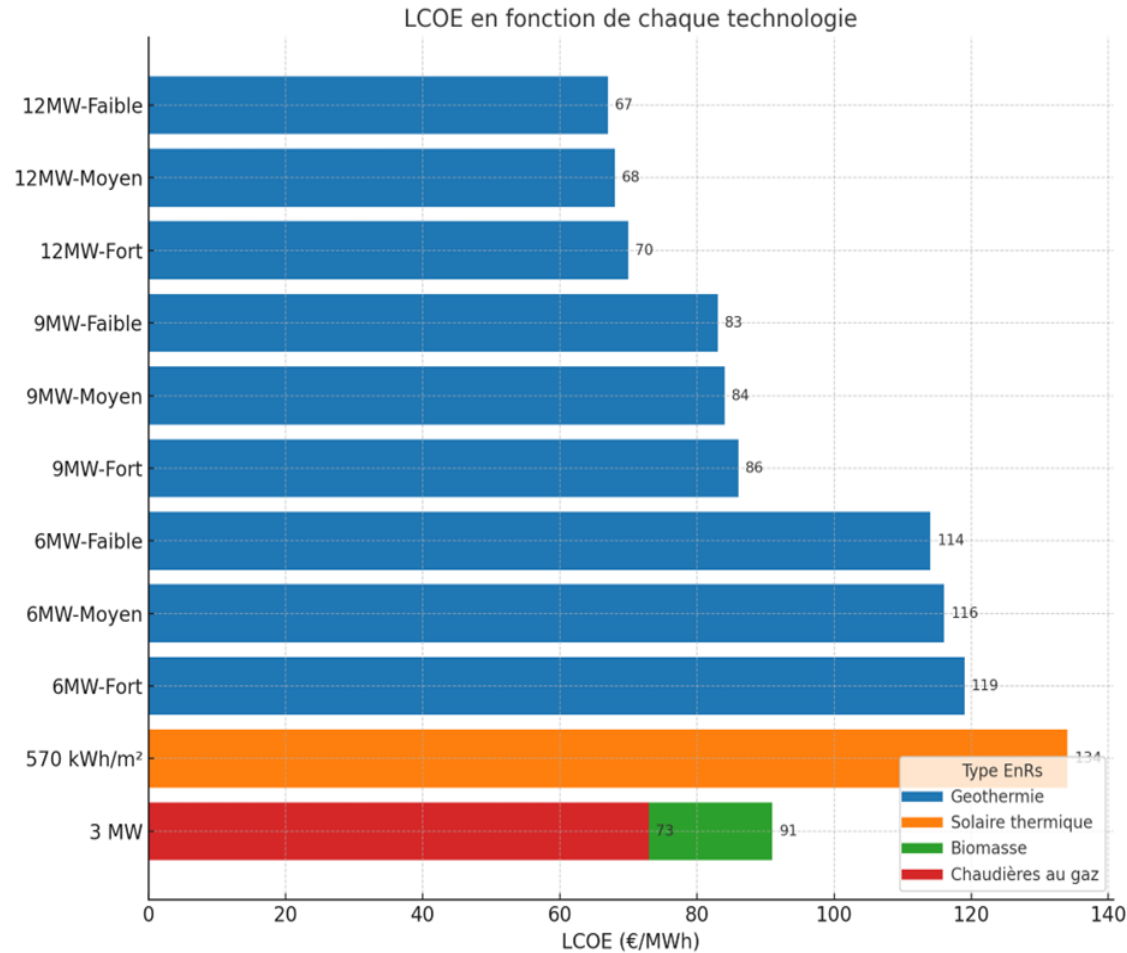
Scenario	Q(m3/h)	Tprod (°C)	Tretour res (°C)	Tinj (°C)	COP PAC	Péchange direct (MW)	Pcond PAC (MW)	Pelec PAC (MW)	Ptotale (MW)	E (MWh)
1	160	55	40	25	6	2.7864	3.34368	0.55728	6.13008	21479.8
2	240	55	40	25	6	4.1796	5.01552	0.83592	9.19512	32219.7
3	320	55	40	25	6	5.5728	6.68736	1.11456	12.26016	42959.6

PUISSANCE(MW)	TAUX D'INTERET (%)	FACTEUR CHARGE (%)	DUREE DE VIE (ANS)	
12	3	40	30	45
	3	40	30	45
	3	40	30	45
9	3	40	30	45
	3	40	30	45
	3	40	30	45
6	3	40	30	45
	3	40	30	45
	3	40	30	45

Hypothèses		
EnRs	Postes	Chiffrage
Chaudières au gaz de 3 MW	Capacité (MW)	3
	Productible (nb. heures/an)	4000
	Rendement sur PCI (%)	91
	Durée de vie (années)	30
	Investissements (€ HT/KW)	63
	Exploitation (€ HT/MWh)	5
	Prix du Gaz naturel (€ HT/MWh)	67
	Taux d'actualisation (3%)	3
Solaires thermiques collectives, tertiaires et industrielles de 500 m²	Productible (kWh/m²)	570
	Durée de vie (années)	30
	Investissement (€/m² HT)	1 280
	Exploitation (€/m²/an HT)	11,1
	Taux d'actualisation (%)	3
Chaudières biomasse collectives et tertiaires en usage direct	Capacité installé (MW)	3
	Heures de fonctionnement par an	3200
	Durée de vie (années)	20
	Rendement (%)	87
	CAPEX (€/KW)	1290
	Coût combustible (€/MWh)	28,8
	Coût OPEX (€/MWh)	34,8
	Taux d'actualisation (3%)	3

2.2 Analyse technico-économique

Résultat 1: Comparaison du LCOE* de la géothermie et des autres sources de chaleur

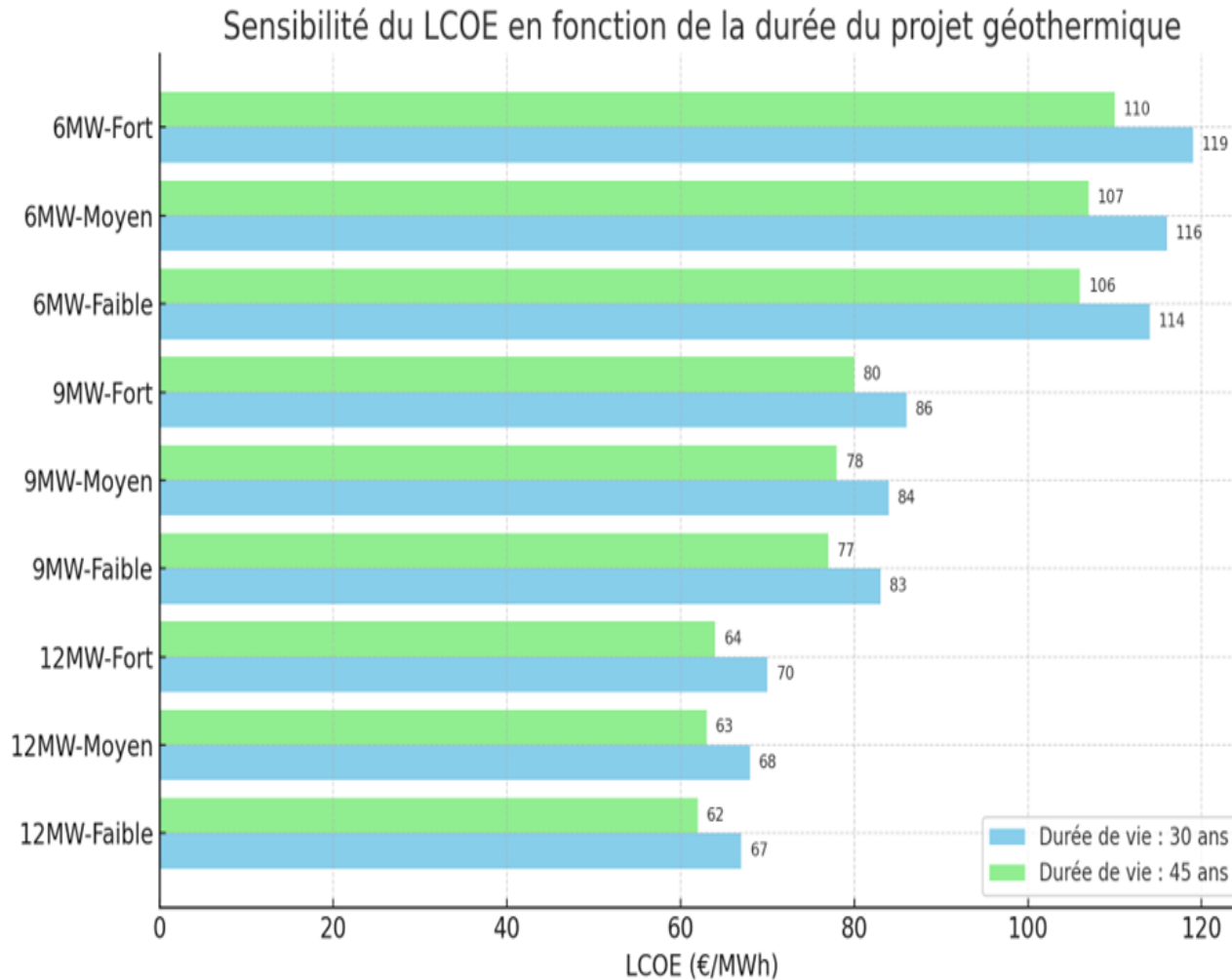


- Projets de **9 et 12 MW** avec un **LCOE compris entre 67 et 86 €/MWh** sont compétitifs comparé aux autres EnR et chaudière gaz
- Projet de **6 MW** avec un **LCOE supérieur à 110 €/MWh** devient moins intéressant excepté en comparaison au solaire thermique
- Les projets ≥ 9 MW doivent être prioriser
- Bien que le segment de risque a un impact limité sur le LCOE (**entre 2 et 5 €/MWh**) il peut être un frein pour l'investissement avec toutefois un accompagnement financier possible via le Fonds de garantie géothermie

*Le LCOE prend en compte l'ensemble des coûts engagés, actualisés sur la durée de vie du projet. Il intègre ainsi l'investissement initial (CAPEX), les coûts d'exploitation et de maintenance (OPEX), ainsi que d'éventuelles dépenses liées au financement ou au remplacement d'équipements

2.2 Analyse technico-économique

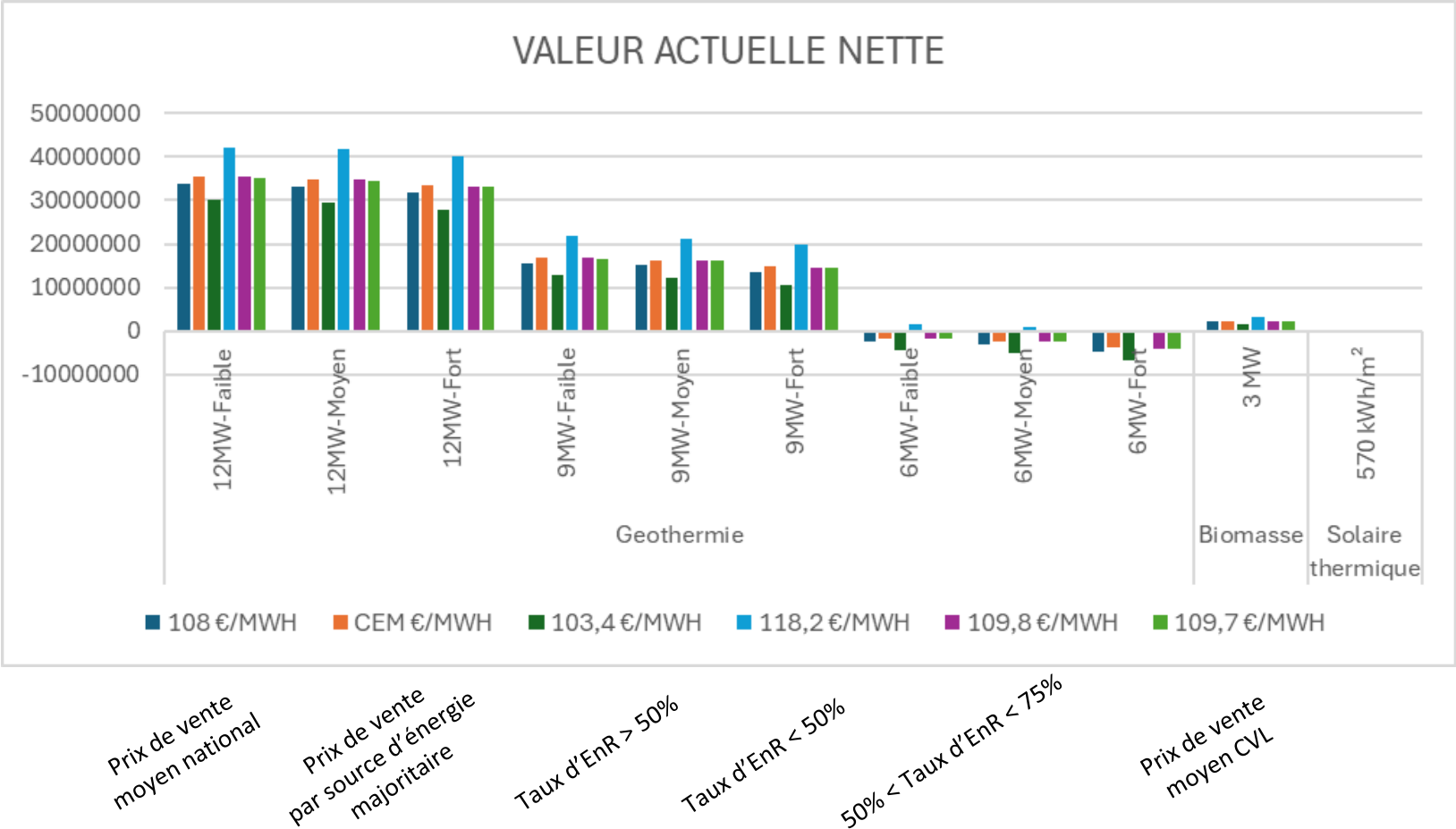
Résultat 2: Evolution du LCOE en fonction de la durée de vie des installations géothermiques profondes



- L'allongement de la durée de vie des installations **de 30 à 45 ans** à un impact bénéfique sur le LCOE avec une baisse **entre 5 et 9 €/MWh** selon le projet
- Baisse plus significative sur les projets de petite taille

2.2 Analyse technico-économique

Résultat 3: Evaluation de la VAN*

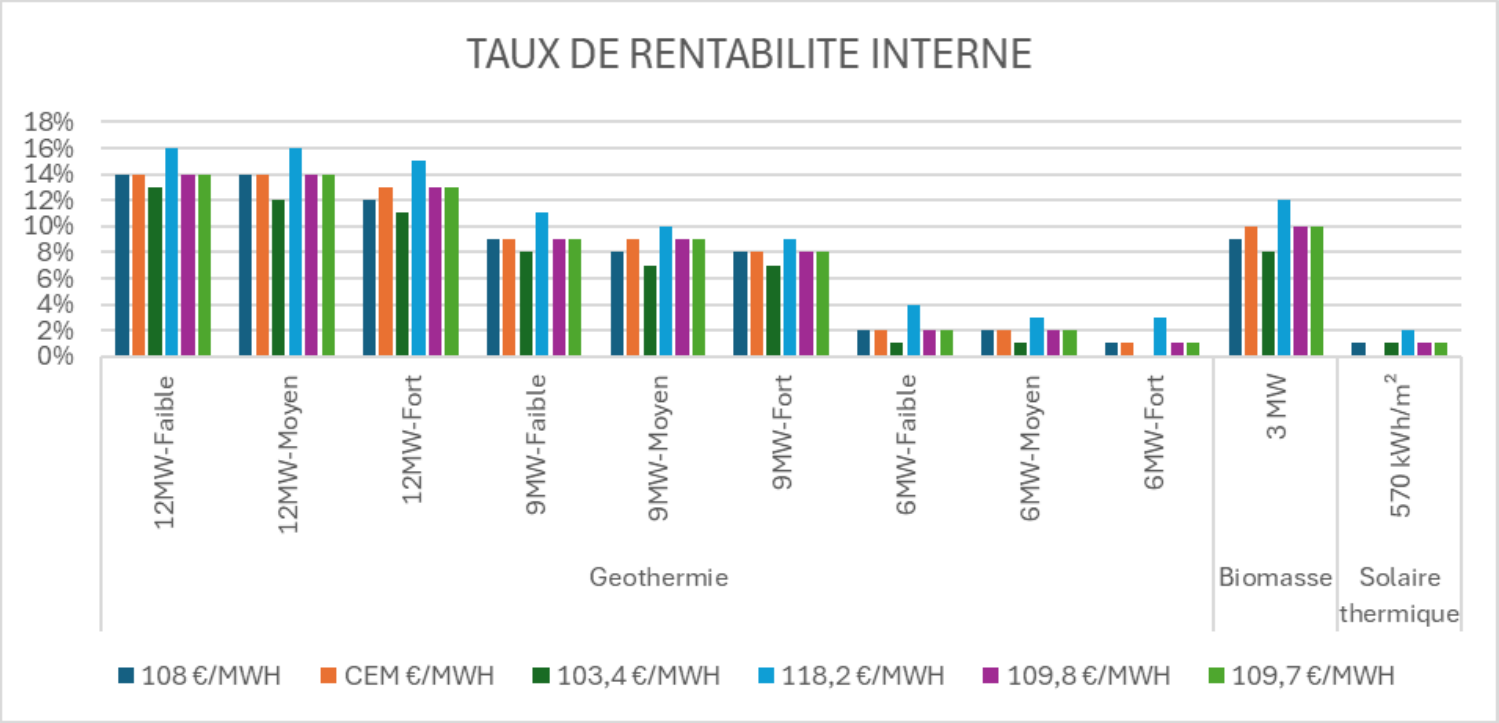


- VAN largement positive pour les projets de 9 et 12 MW
- VAN faible à négative pour les projets de 6 MW
- Biomasse présente une VAN modérément positive
- Solaire thermique présente une VAN négative

*La VAN permet de juger de la rentabilité d'un investissement. Si la VAN est positive, l'investissement est rentable. Si la VAN est négative, l'investissement n'est pas suffisamment rentable pour atteindre le taux de rendement fixé par les investisseurs. Si la VAN est nulle, le projet est juste à l'équilibre financier.

2.2 Analyse technico-économique

Résultat 4: Evaluation du TRI*



- TRI entre 7 et 16% pour les projets de 12 et 9 MW
- TRI entre 0 et 4% pour les projets de 6 MW
- TRI entre 8 et 12% pour la biomasse
- TRI entre 1 et 2% pour le solaire thermique

Prix de vente
moyen national

Prix de vente
par source d'énergie
majoritaire

Taux d'EnR > 50%

Taux d'EnR < 50%

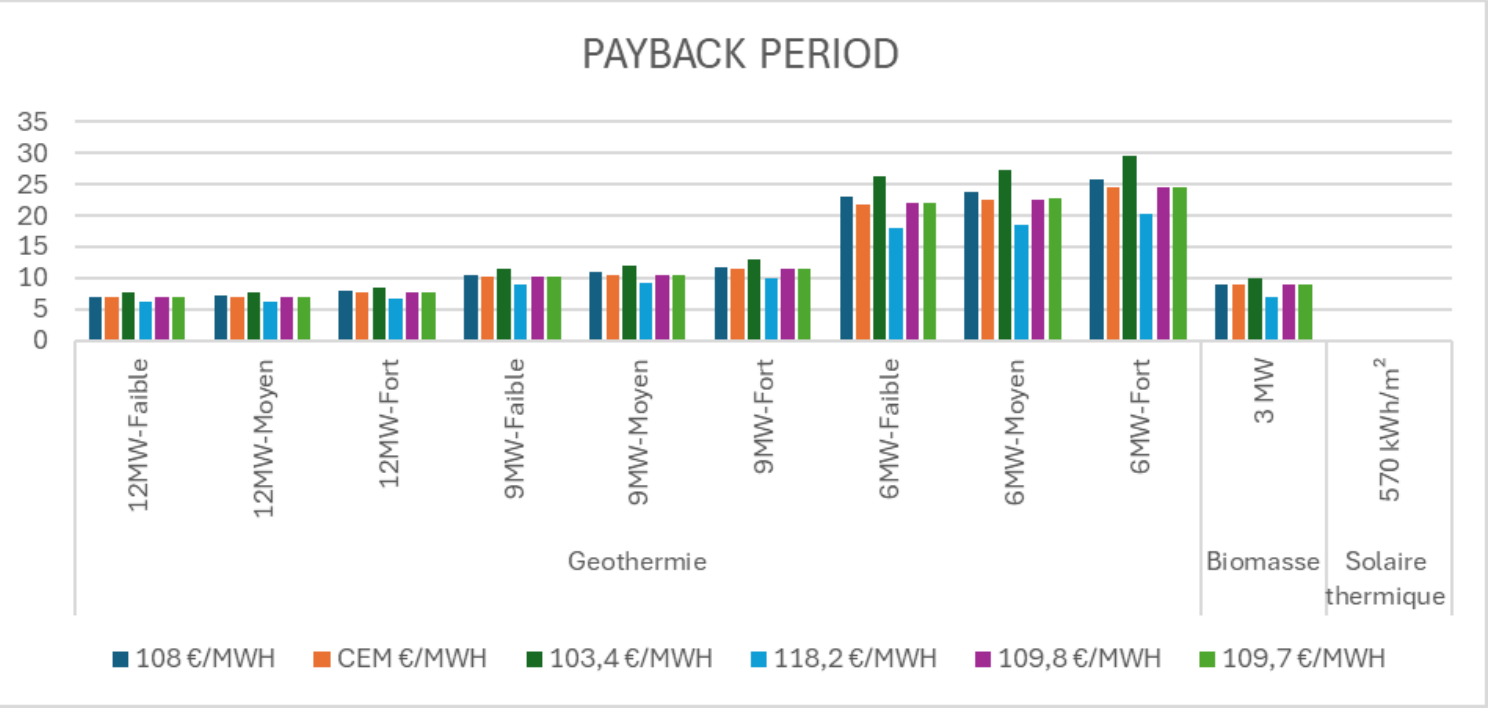
50% < Taux d'EnR < 75%

Prix de vente
moyen CVL

*Le TRI est défini comme le taux d'actualisation qui annule la différence entre la VAN des flux de trésorerie futurs générés par un investissement et le coût initial de cet investissement. Le Taux de Rentabilité Interne est le taux d'actualisation (r) qui annule la Valeur Actuelle Nette.

2.2 Analyse technico-économique

Résultat 5: Temps de retour sur investissement (PP)



- PP entre 7 et 12 ans pour les projets de 12 et 9 MW
- PP entre 18 et 25 ans pour les projets de 6 MW
- PP entre 7 et 10 ans pour la biomasse

Prix de vente
moyen national

Prix de vente
par source d'énergie
majoritaire

Taux d'EnR > 50%

Taux d'EnR < 50%

50% < Taux d'EnR < 75%

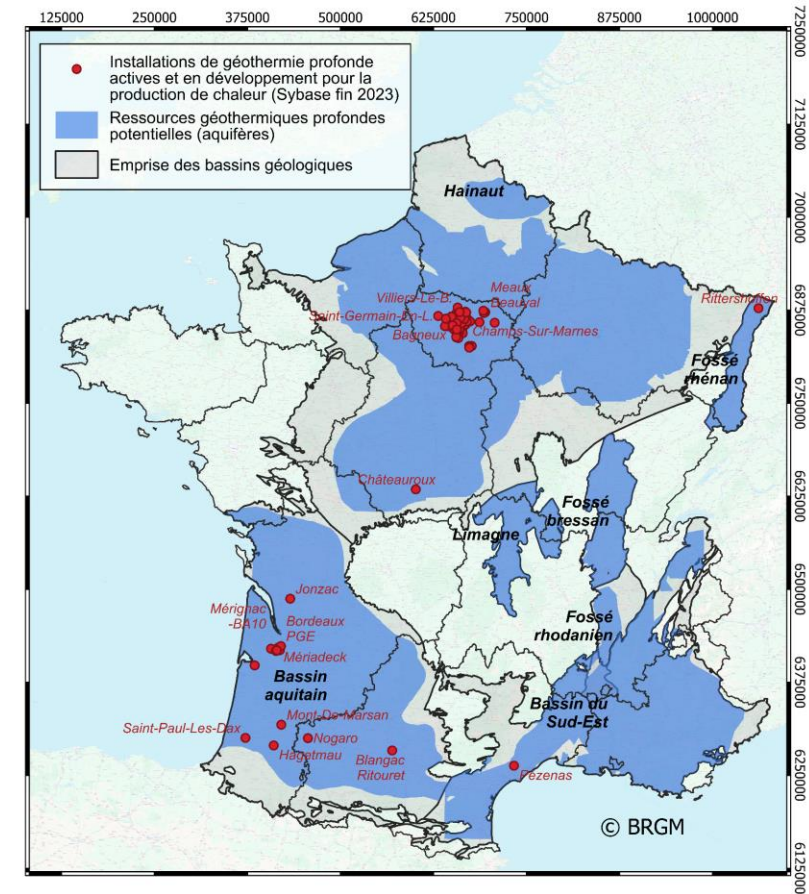
Prix de vente
moyen CVL

**Le temps de retour sur investissement est un indicateur financier qui permet de mesurer le temps nécessaire pour récupérer le montant investi dans un projet*

Annexe: Fonds de garantie géothermie

Garanties Court Terme (étude et travaux) et Long Terme

- Garantie Court terme :
 - Accompagnement possible des études de dérisking : **Indemnisation de 80%** (assiette entre 200k€ et 1M€) **en cas de conclusions négatives ou d'échec du forage** afin d'accompagner la réalisation d'acquisitions géophysiques
 - **90% de taux de garantie sur le doublet et sur toute la France métropolitaine**
 - Une assiette maximum de **3 M€ / km foré** avec un plafond d'assiette de **9 M€ par forage**
 - Typologie de projet: **chaleur** et **coproduction chaleur-lithium**
 - **Cotisation adaptée au niveau de risque** (segment 1: 5%, segment 2: 10%, segment 3: 15%)
- Garantie Long terme (**modalités en cours de validation**):
 - Durée de garantie initiale de **20 ans**, renouvelable sur **10 ans** suite à expertise
 - Cotisation de **35 k€** (indexation TP04 du 12/24 de 130,9)
 - Plafond d'indemnisation sur la durée de la convention de **1,7 M€**
 - Franchise de **156 465,6 €**



Deuxième partie: Impacts et bénéfices environnementaux de la géothermie

2.2 Analyse des impacts environnementaux

Objectifs de l'évaluation environnementale

- Analyser les **effets directs et indirects** d'un projet de géothermie profonde
 - Étudier toutes les phases : forage, exploitation, gestion des rejets
 - **Identifier, quantifier et atténuer** les impacts sur :
 - Écosystèmes
 - Ressources en eau
 - Qualité de l'air
 - Sols et biodiversité
-

Enjeux majeurs

- **Risques sismiques** liés à l'injection/extraction de fluides
 - **Interactions avec les nappes phréatiques**
 - **Émissions de gaz dissous** (CO₂, H₂S)
 - **Consommation de matériaux & énergie**
 - **Nuisances** sonores et visuelles
-

Valeur ajoutée

- Évaluer les **externalités environnementales**
- Orienter la conception vers des **solutions durables**
- Garantir la **conformité réglementaire**
- Favoriser l'**acceptabilité sociale** et la **rentabilité écologique**

2.2 Analyse des impacts environnementaux

Hypothèses – Cycle de vie d'un doublet géothermique (Dogger)

Phase chantier

- Opérations : boucle géothermale, unité de production, réseaux de chaleur
 - Impacts **limités et temporaires**
 - Nuisances : trafic, bruit, poussières, impacts visuels
 - Risques : naturels, technologiques (interactions avec réseaux existants)
 - Autres enjeux : vulnérabilité au climat, gestion des rejets (assainissement)
-

Phase d'exploitation

- Impacts visuels : bâtiments (chaufferie, centrale), réseau de chaleur
 - Déchets & eaux usées : limités, gérés par filières adaptées
 - Bénéfices : réduction consommation fossiles + baisse des émissions GES
 - Contraintes : émissions de la chaufferie à gaz d'appoint → empreinte carbone à maîtriser
 - Nécessité d'une **gestion rigoureuse** des installations auxiliaires
-

Fin de vie

- Opérations : démantèlement des infrastructures, bouchage des forages
- Objectif : remise en état du site
- Enjeu : gestion des déchets (tri, recyclage, traitement spécialisé)
- Filères : décharge, incinération contrôlée

2.2 Analyse des impacts environnementaux

Inventaire des données (ACP & géothermie Dogger)

Référence clé :

- Bartolo (2023) → dossier d'autorisation pour un gîte géothermique au Dogger
 - Données détaillées sur phases **chantier** et **exploitation**
 - Ajout d'une **phase fin de vie** → approche *cycle de vie complet* (du berceau à la tombe)
-

Structuration des données :

- **Phase chantier** → boucle géothermale, unité de production, réseaux
 - **Phase exploitation** → gestion de la boucle, fonctionnement de l'unité, réseau de distribution
 - **Phase fin de vie** → démantèlement, gestion des déchets, remise en état du site
-

Méthodologie :

- 14 impacts recensés, codés initialement en modalités qualitatives :
 - *Aucun* = 0, *Négligeable* = 0, *Positif* = 1, *Négatif* = -1
- Construction d'une **matrice d'impact environnemental**
- Application sous **STATA** pour :
 - Calculer le **score moyen par composante**
 - Évaluer le **score global par phase**

2.2 Analyse des impacts environnementaux

Méthodologie: ACP

Analyse en Correspondances Principales (ACP)

- Méthode d'analyse factorielle pour **variables qualitatives**
 - Utilisée sur des **tableaux de contingence** (fréquences, scores, intensités)
 - Permet d'**identifier les axes principaux** expliquant la variance
-

Intérêt de l'ACP

- Explorer et **visualiser les relations** entre variables catégorielles ou semi-quantitatives
 - **Réduire la dimensionnalité** des données
 - **Synthétiser l'information** pour faciliter l'interprétation
-

Application à la géothermie profonde

- Structurer et interpréter les **scores d'impact environnemental**
- Identifier les **composantes clés par phase du cycle de vie**
- Soutenir l'**évaluation environnementale** et la prise de décision

2.2 Analyse des impacts environnementaux

Implications de l'ACP

Rôle clé :

- Identifier les **phases critiques** d'un projet de géothermie profonde
 - Mettre en évidence les **principales sources d'impact environnemental**
 - Comparer la **contribution relative des phases** (ex. construction vs exploitation)
-

Apports :

- Pistes d'**optimisation concrètes** :
 - Réduire les matériaux à fort impact
 - Améliorer les pratiques d'exploitation (limiter émissions)
 - Optimiser recyclage et gestion des déchets
-

Valeur ajoutée :

- Approche **quantitative & visuelle**
- Hiérarchisation des leviers d'action
- Outil stratégique pour **minimiser l'empreinte écologique** du projet

2.2 Analyse des impacts environnementaux

Résultat 1:

Score moyen d'impact environnemental (par composante)

Phase chantier

- Travaux sur les réseaux → **-1,15** (impact le plus négatif)
- Boucle géothermale → **-0,846**
- Unité de production → **-0,06** (faible impact)
 -  Impacts négatifs marqués liés aux travaux lourds (forage, infrastructures).

Phase exploitation

- Unité de production → **-0,94** (impact critique : consommation énergie, émissions)
- Boucle géothermale → **+0,017** (quasi neutre)
- Travaux sur les réseaux → **+0,017** (quasi neutre)
 -  Impacts globalement faibles, sauf unité de production.

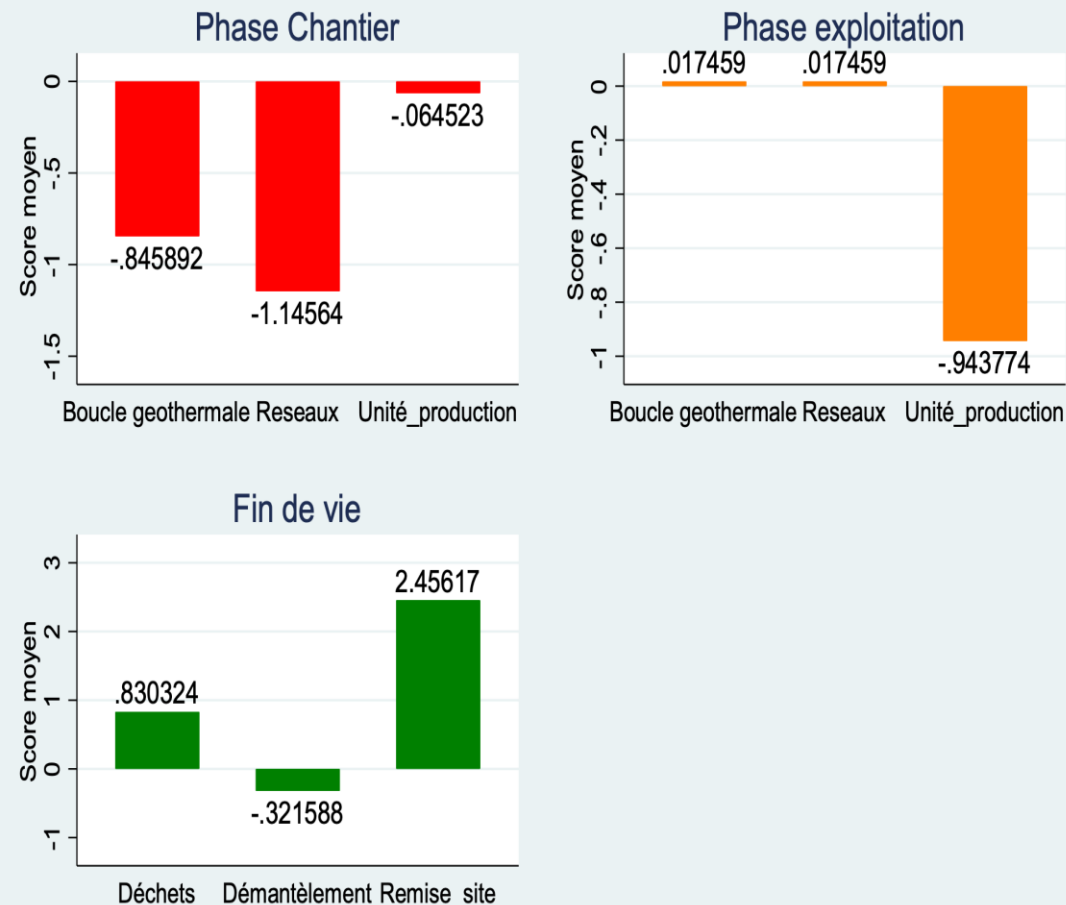
Phase fin de vie

- Gestion des déchets → **+0,83** (recyclage, valorisation)
- Démantèlement → **-0,32** (consommation matériaux, énergie)
- Remise en état du site → **+2,45** (effet fortement positif)
 -  Bilan globalement positif grâce à la restauration écologique.

Synthèse globale

- **Phase chantier** = impacts négatifs les plus marqués (réseaux, forage)
- **Phase exploitation** = impacts faibles, sauf unité de production critique
- **Phase fin de vie** = bilan positif grâce à la remise en état et au recyclage
- **Axes d'amélioration :**
 - Réduire l'impact de la boucle géothermale dès le chantier
 - Optimiser les performances environnementales de l'unité de production

ACV d'un doublet au Dogger par composante



2.2 Analyse des impacts environnementaux

Résultat 2:

📊 Scores moyens d'impact environnemental par phase

Phase de chantier

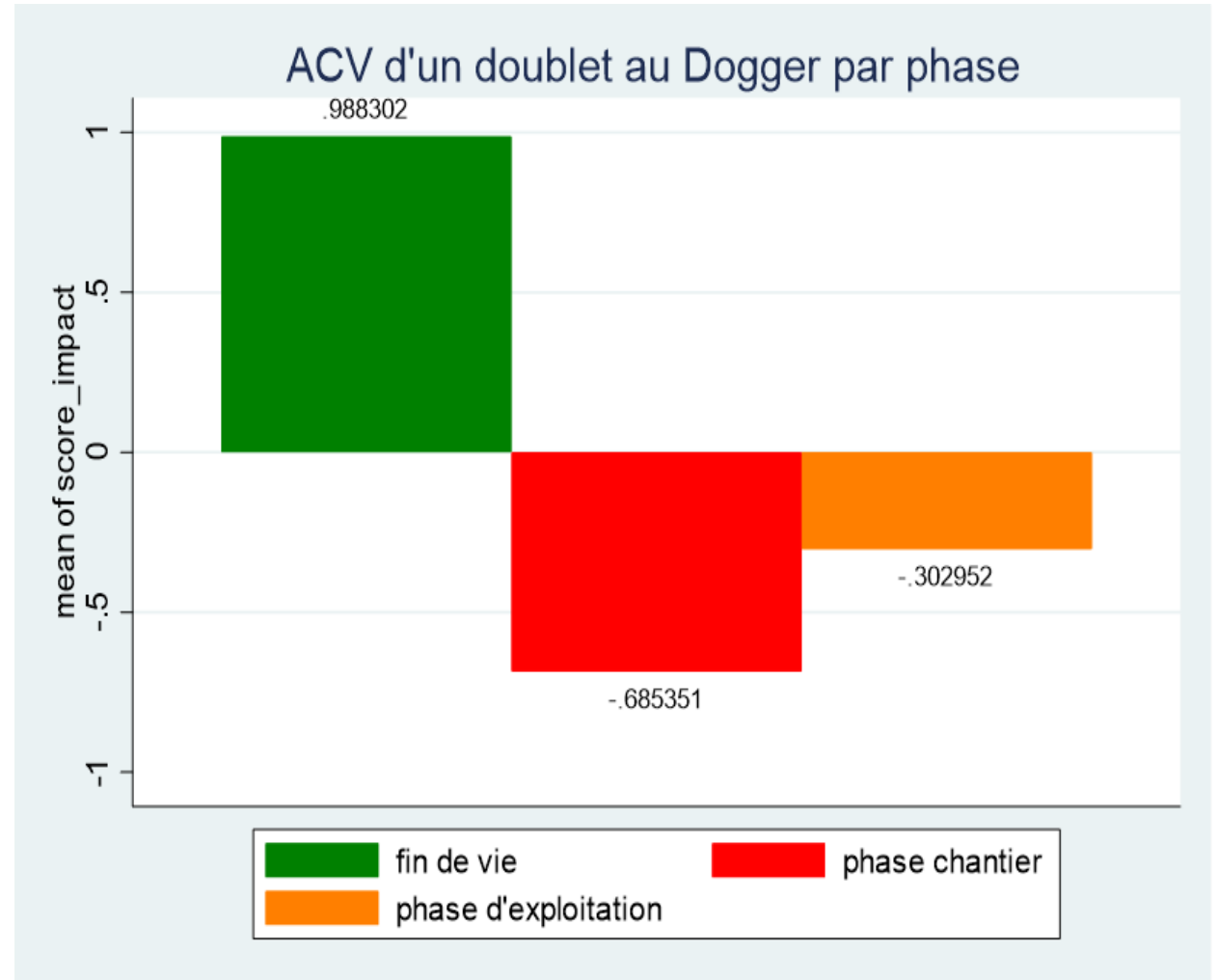
- Score moyen : **-0,685**
 - Causes principales :
 - Forage profond
 - Utilisation de machines lourdes
 - Forte consommation énergétique (installation boucle géothermale)
 - Émissions de CO₂
- 📌 **Phase la plus critique** → nécessite des actions d'atténuation (équipements + efficaces, matériaux durables).

Phase d'exploitation

- Score moyen : **-0,303**
 - Causes principales :
 - Consommation énergétique de l'unité de production
 - Émissions liées à l'entretien
- 📌 Impact négatif mais **moins marqué** que le chantier → potentiel d'optimisation (efficacité énergétique).

Phase de fin de vie

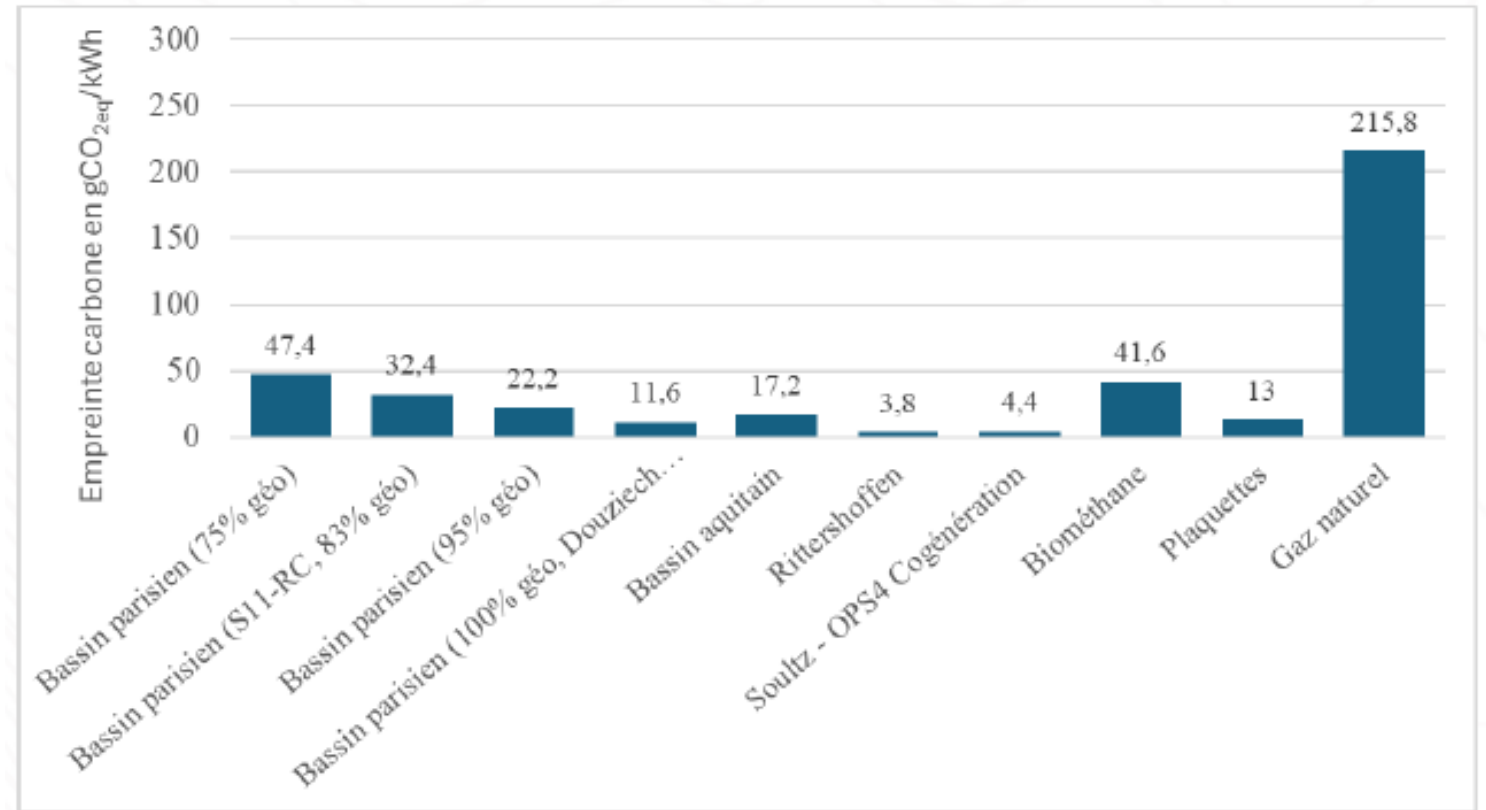
- Score moyen : **+0,988**
 - Facteurs positifs :
 - Recyclage des matériaux
 - Remise en état du site (restauration écologique)
 - Gestion optimisée des déchets
- 📌 **Bilan environnemental positif** (compense largement les impacts précédents).



2.2 Analyse des impacts environnementaux

Résultat 3: Émissions de CO₂ sur l'ensemble cycle de vie : géothermie profonde vs autres sources d'énergie

- Un taux d'émission (gCO₂/kWh) qui place la géothermie profonde comme une source d'énergie renouvelable comparable à la biomasse
- Principaux éléments contributeurs: les travaux de forage (tubages acier et diesel)
- Réduction de l'empreinte possible avec un rig électrique, une valorisation maximisée de la géothermie et l'utilisation d'autres matériaux (tubages en composite)



Source : ADEME (2020), FEDENE (2023), Douziech et al (2020), Douziech et al (2021), Wagner et al (2023), Base Empreinte® de l'ADEME

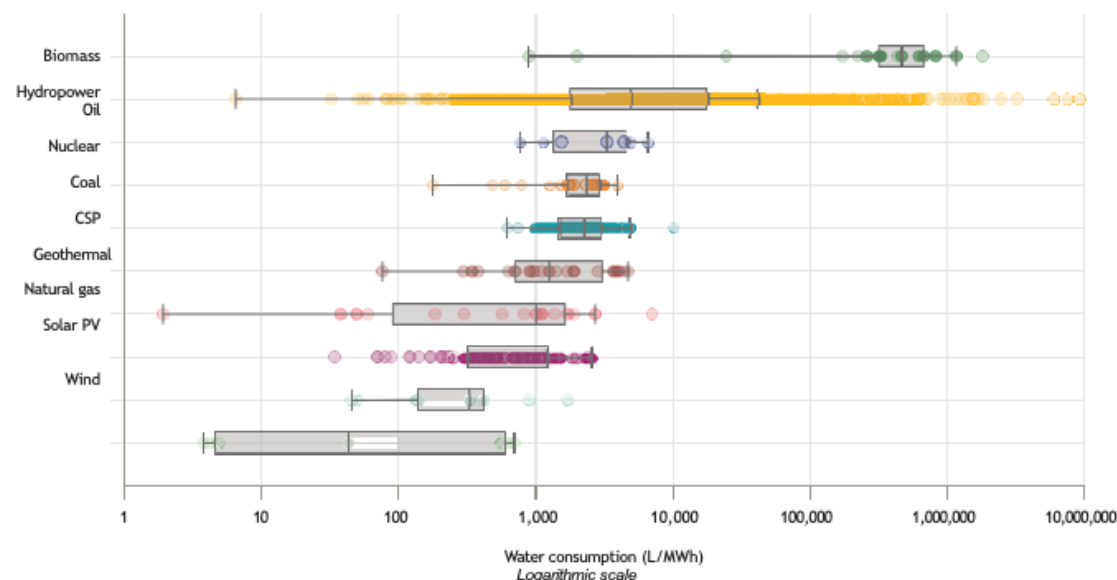
Annexe: cas de la production d'électricité

Impact de la géothermie profonde en termes d'utilisation de l'eau pour la production d'électricité

- Une consommation d'eau beaucoup plus faible que l'hydroélectricité et la biomasse, comparable à celle du solaire ou de l'éolien sur l'ensemble du cycle de vie
- Source: Next Generation Geothermal, WRI Report, novembre 2024

Next-generation geothermal: Considerations and opportunities for responsible development

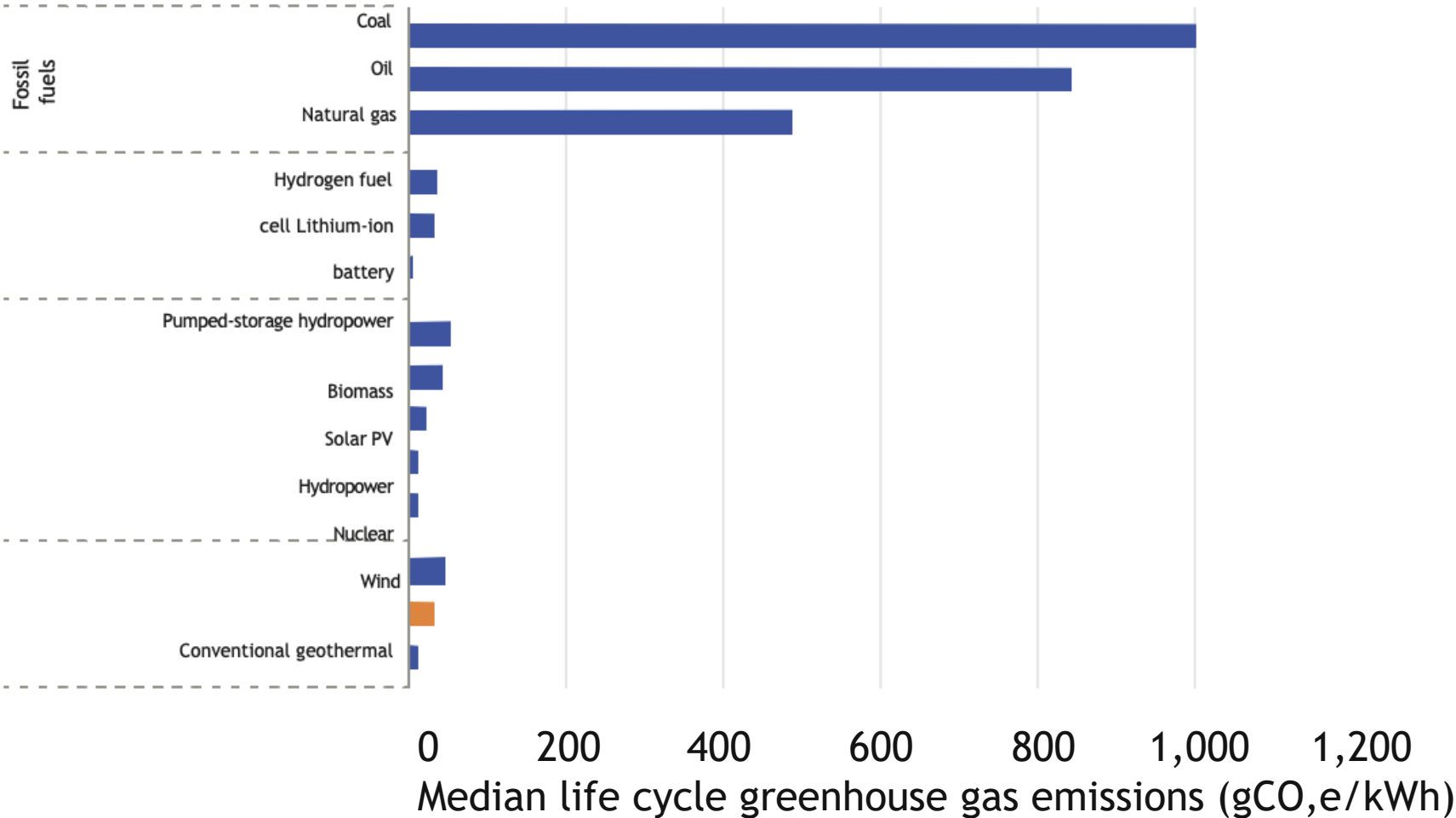
Figure 6. Blue water consumption over the life cycle of geothermal compared to other types of energy



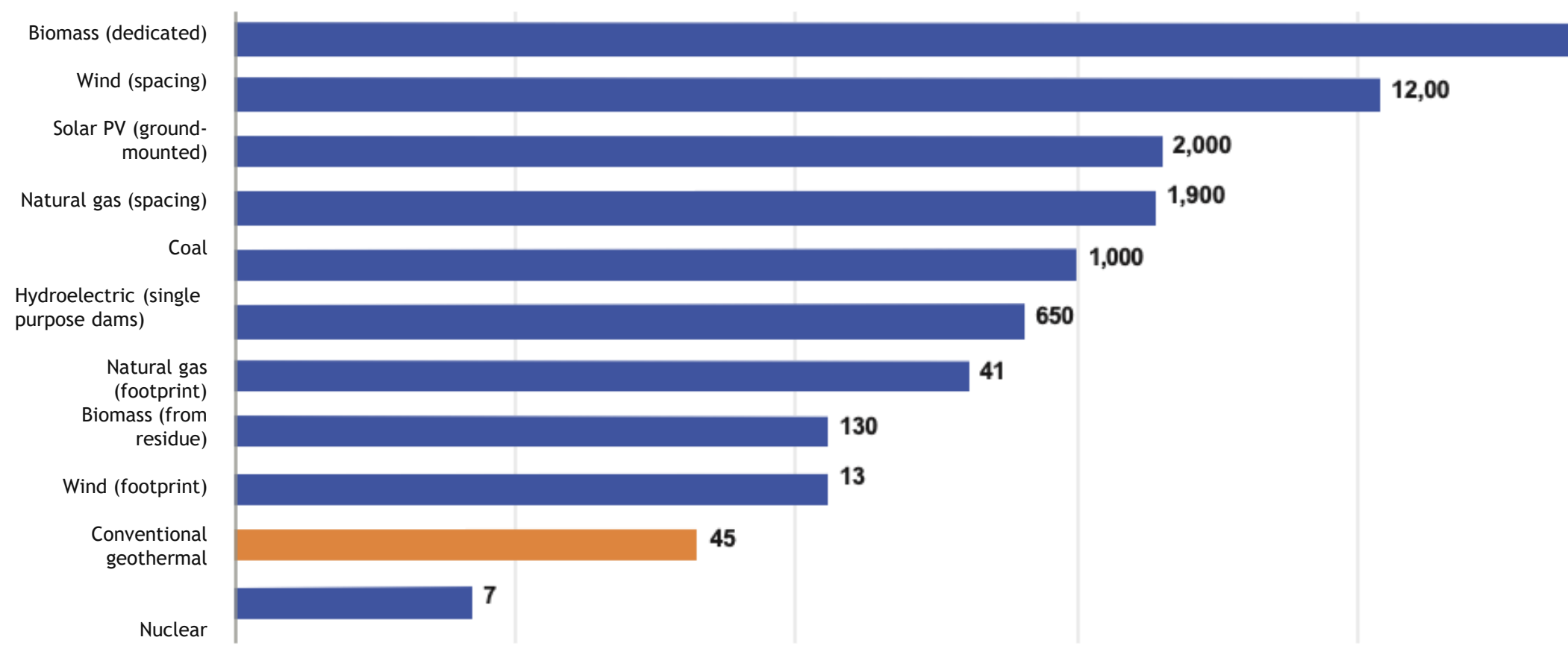
Notes: CSP = concentrated solar power; L = liters; MWh = megawatt-hour; PV = photovoltaic. Dots represent averages; circles are outliers. Blue water is surface water and groundwater. Geothermal energy includes both conventional geothermal and enhanced geothermal systems (EGS). The median for EGS is 1,670, and the median for conventional geothermal is 244.

Source: Jin et al. 2019.

Emissions de CO2 pour différentes techniques de production d'électricité



Et en termes d'impact sur l'utilisation des sols



2.3 Les besoins de chaleur et la ressource en région Centre-Val de Loire

1. **Besoins de chaleur à l'échelle de la région**
2. **Evaluation de la ressource géothermale**
3. **Premiers résultats sur le Loiret**

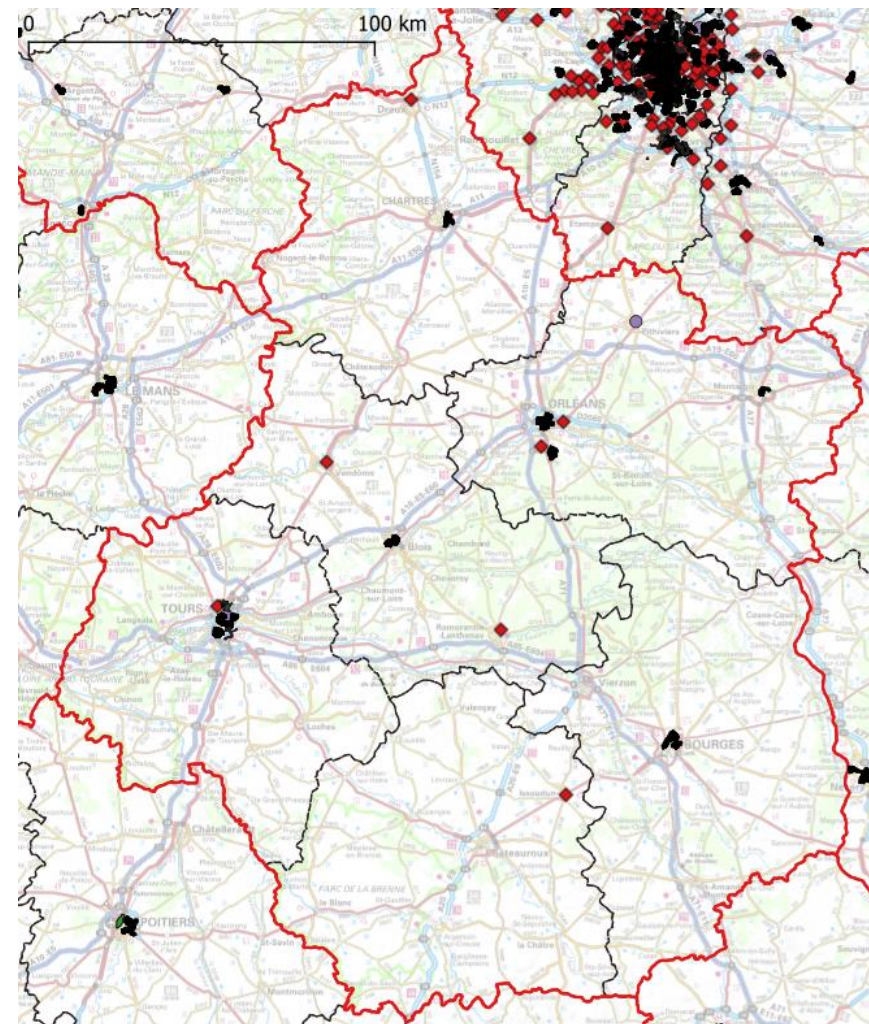
2.3 Les besoins de chaleur en région Centre-Val de Loire

• Réseaux de chaleur existants (>20 GWh) en région Centre-VDL:

- **Orléans:**
 - Réseau Socos Orléans La Source (30 km, 125,3 GWh, Taux EnR&R 64,7%)
 - Réseau Quartier Centre Ville et Nord (24 km, 95,2 GWh, Taux EnR&R 91,7%)
 - Réseau de Fleury les Aubrais (8 km, 27,5 GWh, Taux EnR&R 57,9%)
- **Chartres:** réseau de Chartres Métropole Energies (18 km, 54,7 GWh, Taux EnR&R 90,4%)
- **Blois:**
 - Réseau Quartier Bégon et Chevalier (11,9 km, 48,7 GWh, Taux EnR&R 91,7%)
 - Réseau Eco Chaleur de Blois (10 km, 27,4 GWh, Taux EnR&R 93,4%)
- **Tours:**
 - Réseau Morier et Rabière (22 km, 71 GWh, Taux EnR&R 56%)
 - Réseau Zup des bords de Cher et Sanitas (20 km, 116,8 GWh, Taux EnR&R 73,1%)
 - Réseau Quartier Chateaubriand (3 km, 25,8 GWh, Taux EnR&R 0%)
 - Réseau de la ville de Saint Pierre des Corps (6 km, 30 GWh, Taux EnR&R 65,4%)
 - Réseau de chaleur TM-ED (10,2 km, 65,3 GWh, Taux EnR&R 72,1%)
- **Bourges:** Réseau Chancellerie Gibjoncs – Zup de Bourges (18,6 km, 75,5 GWh, Taux EnR&R 93,5%)
- **Pithiviers:** réseau d'eau chaude Malteries Pithiviers (24,8 GWh)
- **Montargis:** réseau Zup du Grand Clos (8 km, 26 GWh, Taux EnR&R 87,7%)

• Réseaux à créer (>20 GWh) en région Centre-VDL:

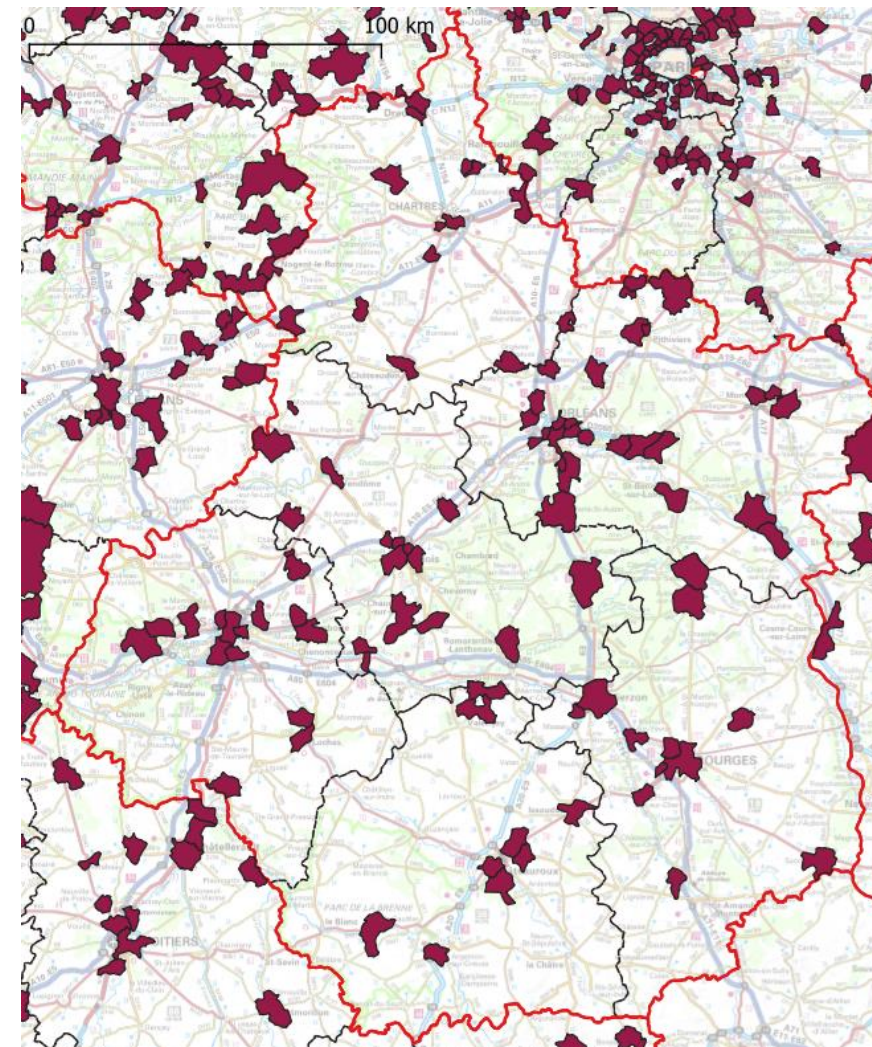
- **Orléans** (Saint-Jean-de-Braye, Olivet), **Vendôme**, **Romorantin-Lanthenay**, **Issoudun**, **Tours**, **Dreux**



Sources: CEREMA et MANERGY

2.3 Les besoins de chaleur en région Centre-Val de Loire

- **Besoins de chaleur industriels en région Centre-VDL (> 20 GWh/an)** pour les process et chauffage des locaux (température des besoins non connue)
- De l'ordre de **7606 GWh/an**
- **Les industriels interrogés:**
 - Laboratoire Expanscience (Epernon)
 - Fabricant de produits pharmaceutiques et dermocosmétiques
 - Besoin de chaleur haute température (vapeur) pour les process ou besoin en climatisation des bâtiments
 - Sources d'énergie: chaudière gaz et biomasse en projet
 - Géothermie profonde envisagée pour le projet d'extension mais non retenue (du fait du besoin HT)
 - Groupe LSDH (Saint-Denis de l'Hôtel)
 - Industrie agroalimentaire
 - Besoin essentiellement de vapeur pour les processus de stérilisation / pasteurisation (>90°C)
 - Sources d'énergie: chaudière gaz et biomasse en projet
 - Swiss Krono (Sully-sur-Loire)
 - Fabricant de panneaux de bois : panneaux de particules (PP), panneaux mélaminés et panneaux OSB (Oriented Strand Board).
 - Besoin de chaleur pour le séchage du bois (particules pour la PP et lamelles de bois pour l'OSB) et pour chauffer les presses avec un réseau d'huile thermique (280°C).
 - Mise en place de deux nouveaux sècheurs à basse température à l'OSB. Ils sont alimentés en eau surchauffée à 120°C et en eau chaude à 50 °C.
 - Sources d'énergie : nouvelle chaudière biomasse de 65 MW (écorces + poussières) + gaz en secours.
 - La géothermie pourrait être intéressante avec ses nouveaux sècheurs à « basse » température.



Source: CEREMA

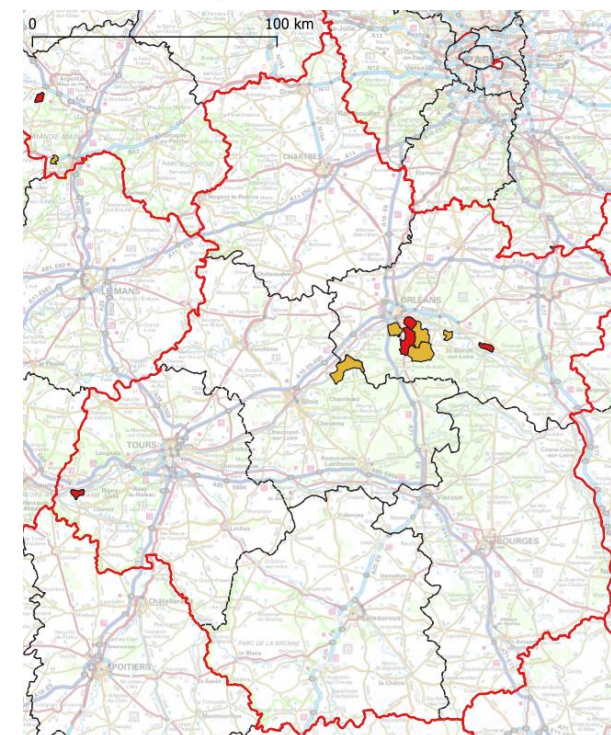
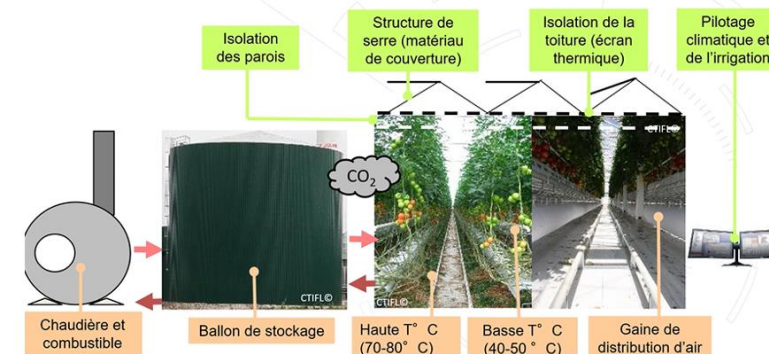
2.3 Les besoins de chaleur en région Centre-Val de Loire

• Surface des serres chauffées en région Centre-VDL :

- Une forte concentration **dans le département du Loiret** avec **59,9 ha** de serres chauffées sur les communes de :
 - **Bonnée (11,8 ha)**
 - Marcilly-en-Villette (1 ha)
 - Olivet (3 ha)
 - Ouvrouer-les-Champs (3,5 ha)
 - **Sant-Cyr-en-Val (10,7 ha)**
 - **Saint-Denis-en-Val (28,15 ha)**
 - Sandillon (1,7 ha)
- Les autres départements concernés sont le **Loir-et-Cher** et l'**Indre-et-Loire**
 - Saint-Laurent-Nouan (2,1 ha)
 - **Avoine (11,7 ha)**

• Les serristes interrogés:

- Producteurs principalement de concombres, poivrons et aubergines sous serres (entre 2 et 6 hectares de superficie suivant le type de culture/production)
- Consommation importante de chaleur pour le chauffage des serres (entre 5 et 30 GWh de consommation annuelle de gaz)
- Niveau de température idéal à partir de 65-70°C (90°C pour du stockage thermique) mais récupère également la chaleur des eaux à 35-45°C issue des groupes froids → eau à 50/55 degrés devrait couvrir une très grande partie des besoins.
- Sources d'énergie: chaudière gaz et cogénération → entre 1.5 et 2.5 GWh de gaz par hectare en fonction de la culture et du calendrier de plantation



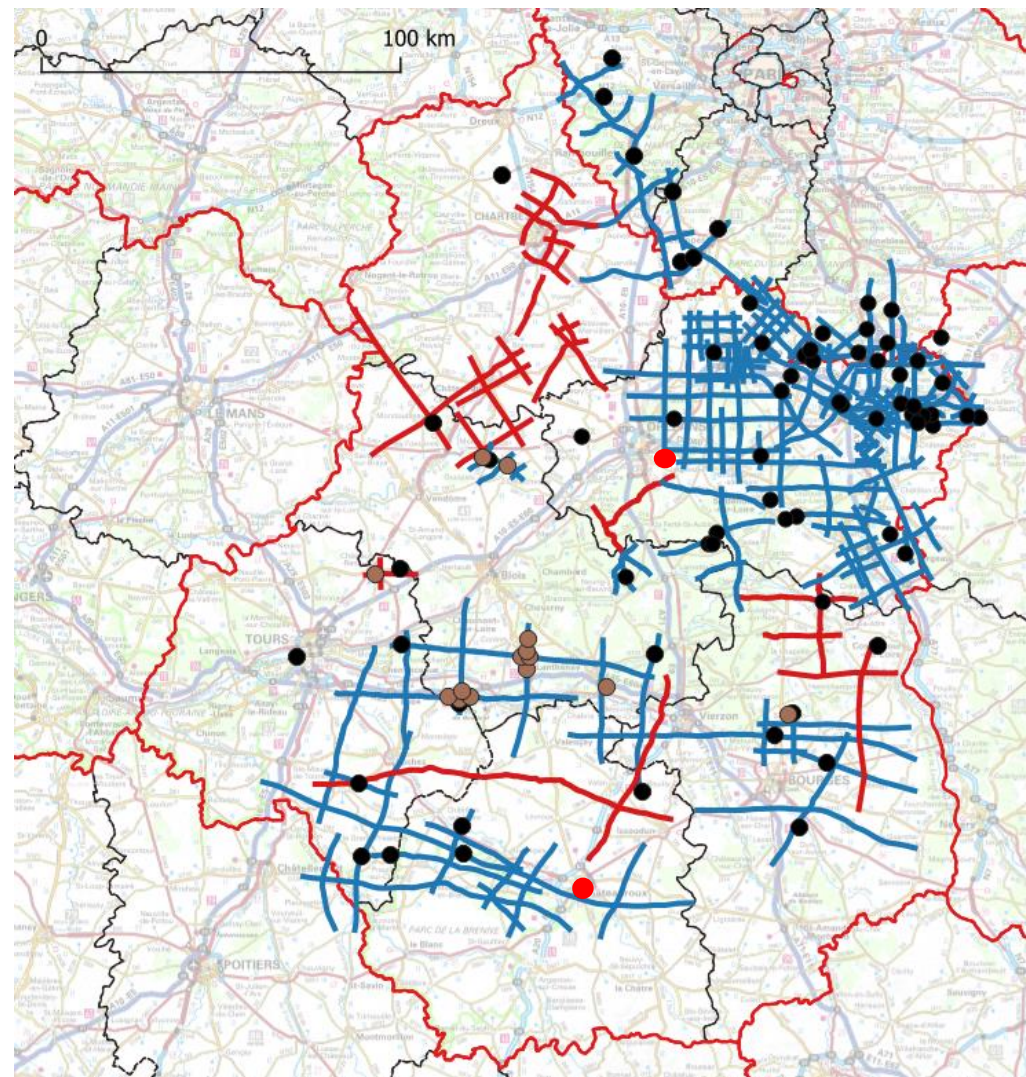
Sources: CTIFL et Légumes de France

2.3 Evaluation de la ressource géothermale

- Etude financée par la DGECC qui a pour objectif **d'améliorer la connaissance du sous-sol dans des secteurs où la géothermie profonde est encore peu ou pas développée**
- **1^{ière} application dans la région Centre-Val de Loire**
- **Méthodologie adoptée:**
 - **Echelle de travail régionale** qui vise à synthétiser et analyser les données existantes (puits, sismiques) pour déterminer les zones les plus favorables à priori en termes de ressources géothermales
 - Estimation basée principalement sur **la profondeur des réservoirs, leur extension, leur épaisseur, les températures attendues et la qualification de leur potentiel réservoir**
 - Analyse basée **sur le traitement de données de puits (hydrocarbures, stockage de gaz, géothermie) et le retraitement de lignes sismiques anciennes** pour préciser la géométrie des réservoirs, leur structure, les faciès réservoir et leurs propriétés pétrophysiques suivant la qualité des données disponibles
 - Production d'un **modèle 3D des réservoirs analysés (Oxfordien, Dogger et Trias supérieur) et cartographies 2D des aquifères** (profondeur des toits et murs, épaisseur totale/utile, température, favorabilité géologique)
 - Diffusion de l'ensemble des résultats pour le Loiret sur le site geothermies (<https://www.geothermies.fr/geoscan-hexagone>)

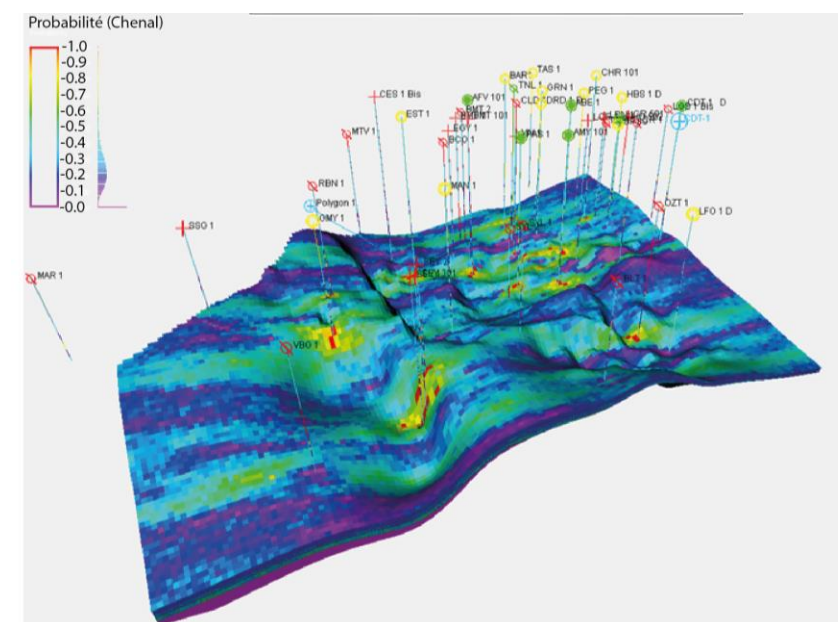
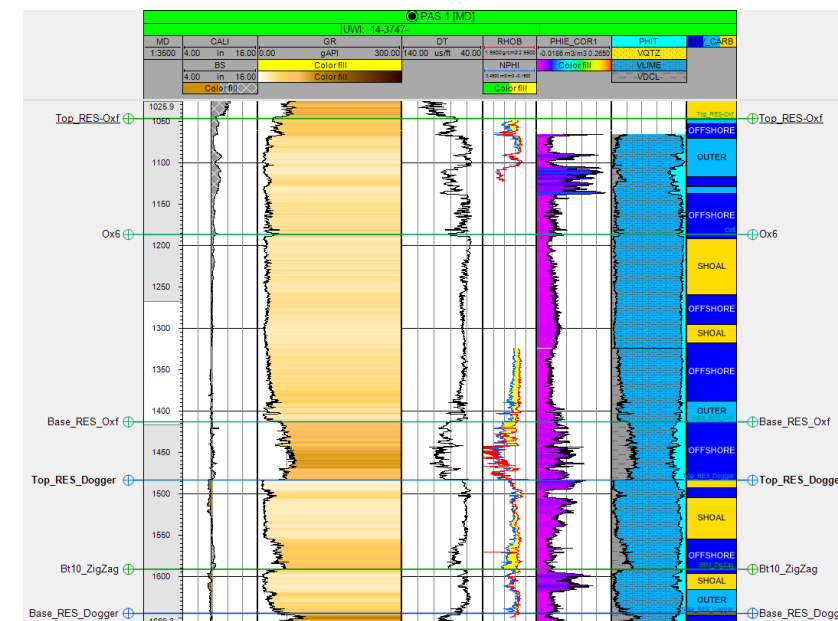
2.3 Evaluation de la ressource géothermale

- Les données analysées en région CVL:
 - **88 forages profonds dont les diagraphies ont été valorisées** (GR, DT, NPHI, RHOB...) dont 71 forages d'hydrocarbures (points noirs), 2 puits géothermiques (points rouges) et 15 puits de stockage de gaz (points marrons)
 - **4285 de lignes sismiques retraitées** dans le cadre du projet (bleu: lignes post-1970, rouge: lignes ante-1970)
 - **Des interprétations pétrophysiques sur une vingtaine de puits et de l'ordre de 900 km d'inversion sismique seront réalisés** (relations entre les impédances acoustiques et propriétés des réservoirs telles que la porosité)



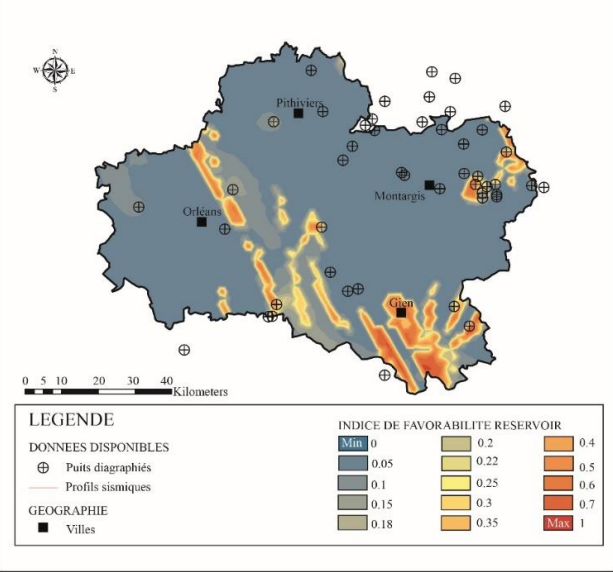
2.3 Evaluation de la ressource géothermale

- Méthodologie pour définir un potentiel réservoir
 - Définition des environnements de dépôts (diagraphies de puits, études bibliographiques)
 - Calcaires de l'Oxfordien et du Dogger: environnements du type « offshore » (dépôts marneux et alternances marno-calcaires), « outer » (calcaires de types wackstone / packstone) et « **shoal** » (calcaires oolithique)
 - Grès du Trias: environnements du type « plaine d'inondation » (dépôts argileux et carbonates), « lobes et crevasses » (alternance d'argiles et de grès lités) et « **chenaux** » (grès fluviaux)
 - Elaboration d'un modèle 3D Pétrél rempli en environnements de dépôts par modélisation stochastique
 - Production de carte de favorabilité par réservoir analysé = **probabilité d'intercepter sur toute la hauteur du réservoir un environnement de dépôts ayant des qualités de réservoir (de type « shoal » pour les carbonates ou « chenaux » pour les grès)**

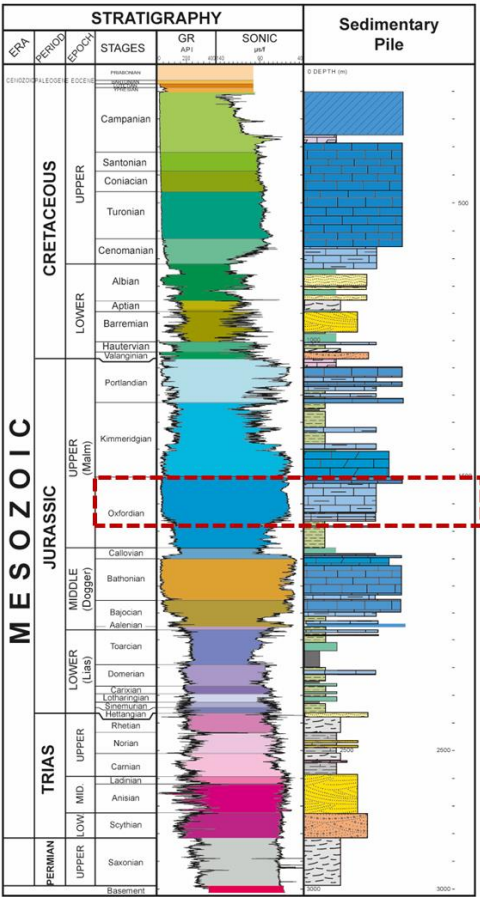
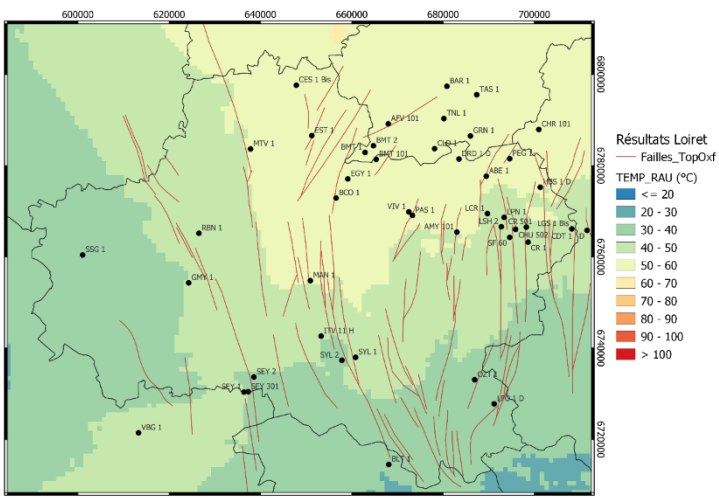
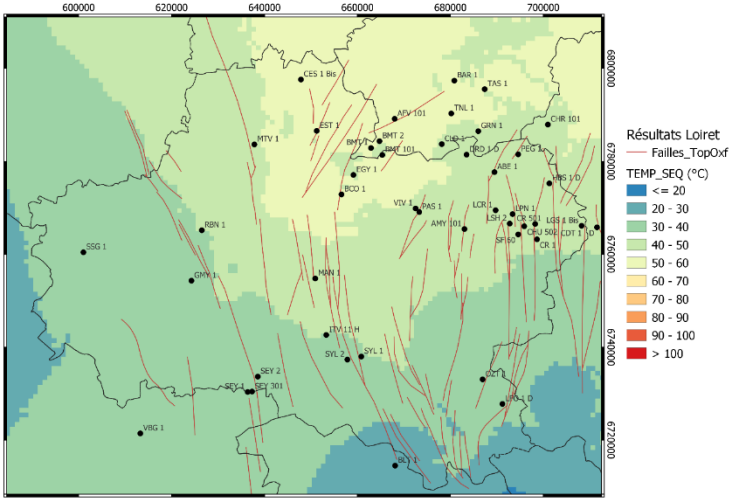
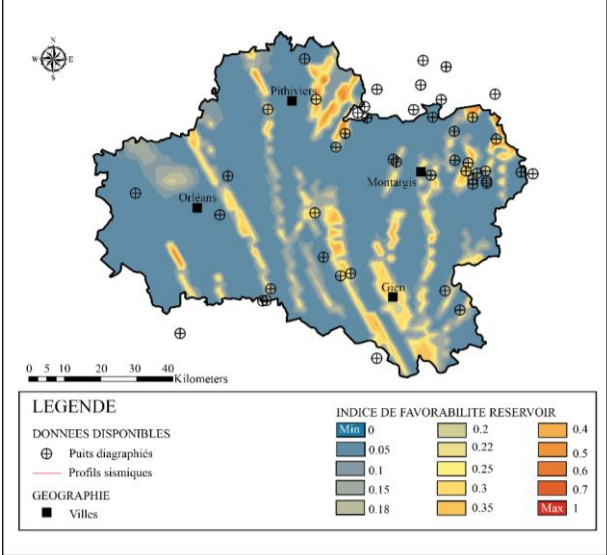


2.3 Premiers résultats sur le Loiret

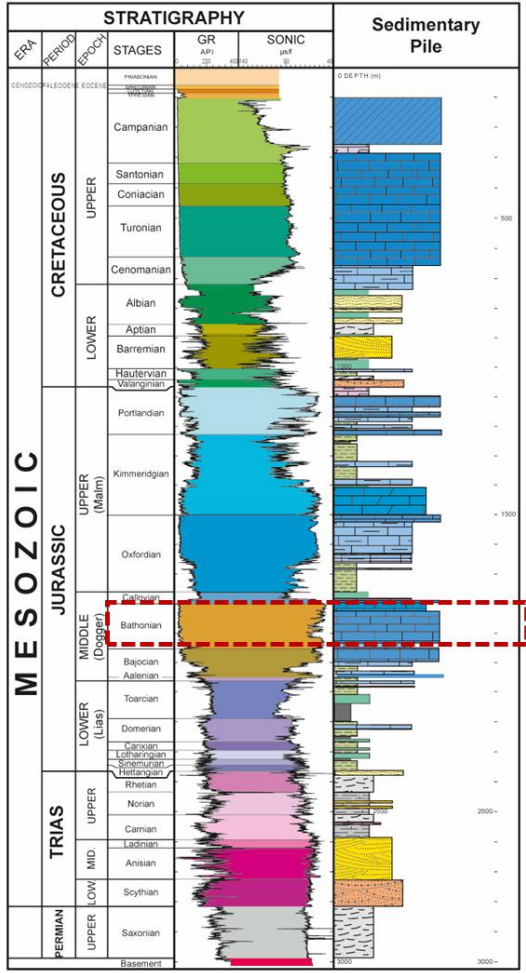
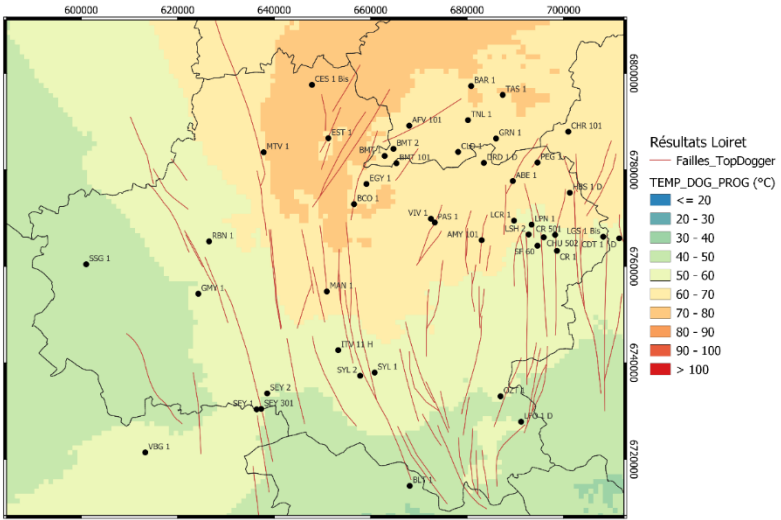
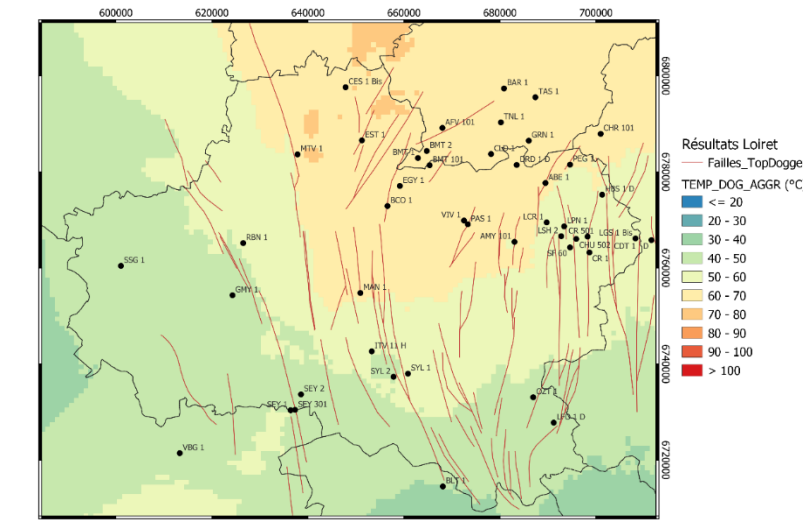
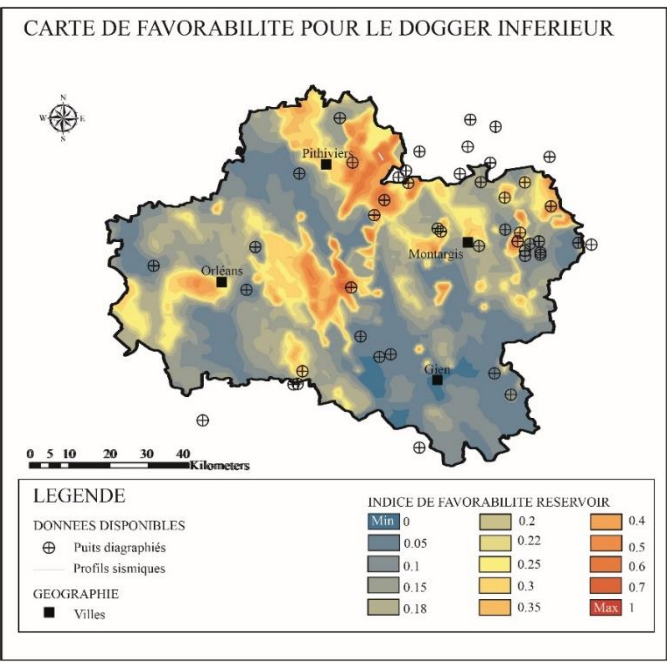
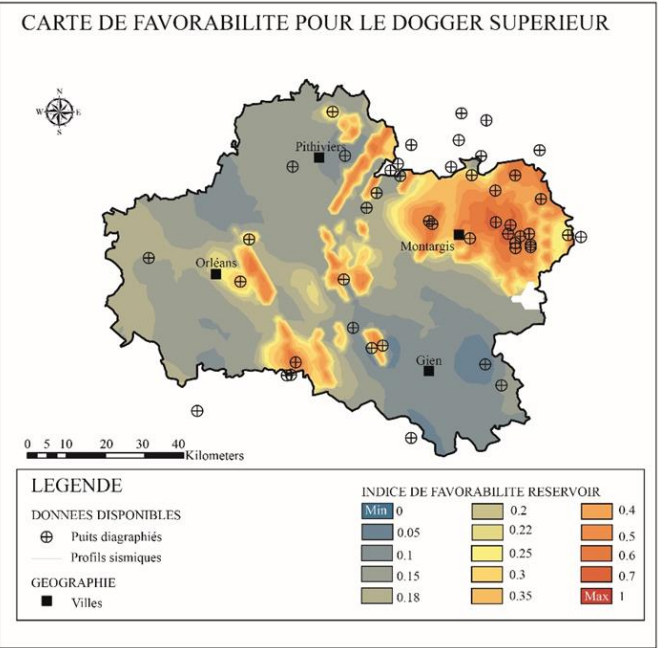
CARTE DE FAVORABILITE POUR L'OXFORDIEN SUPERIEUR



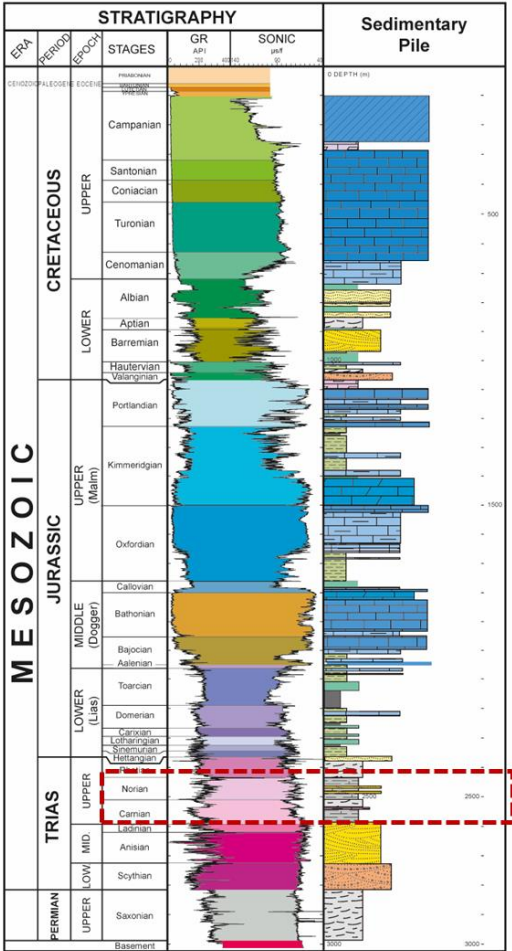
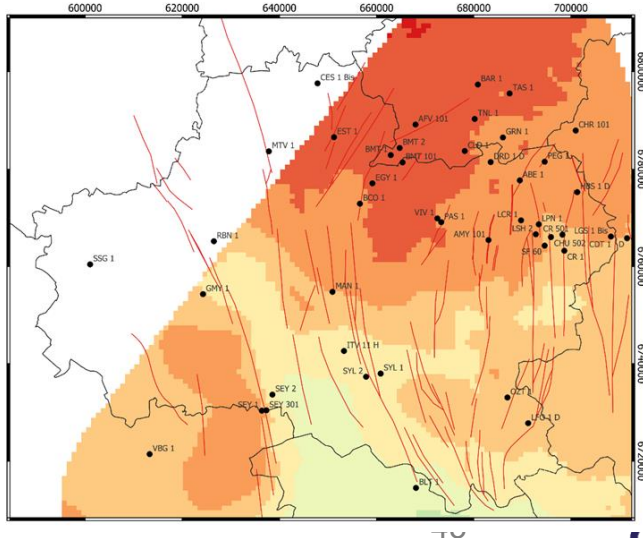
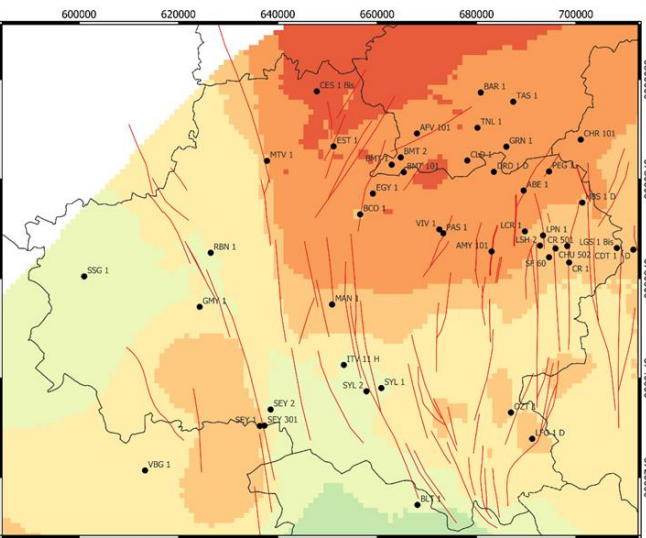
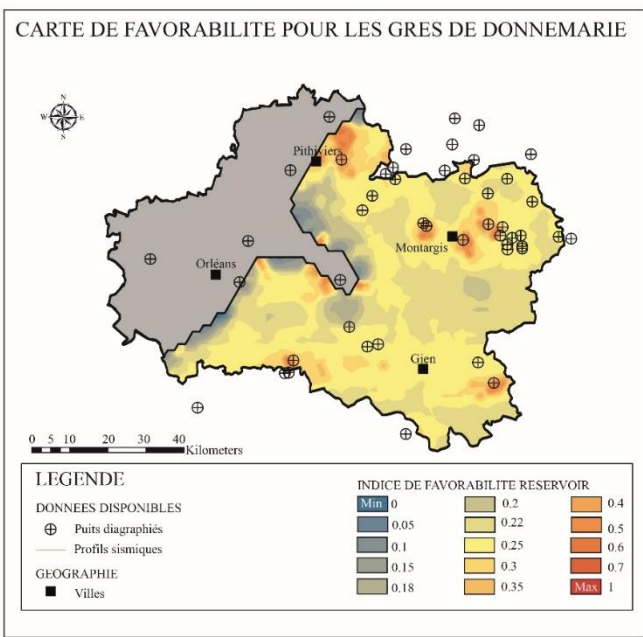
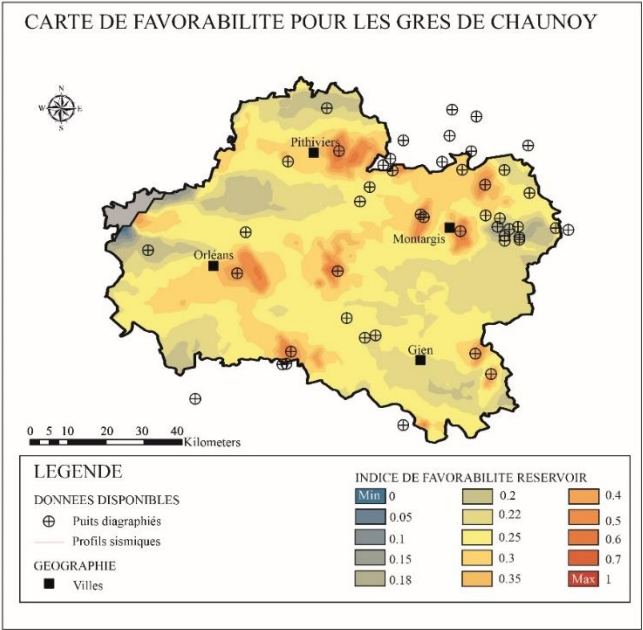
CARTE DE FAVORABILITE POUR L'OXFORDIEN MOYEN



2.3 Premiers résultats sur le Loiret



2.3 Premiers résultats sur le Loiret

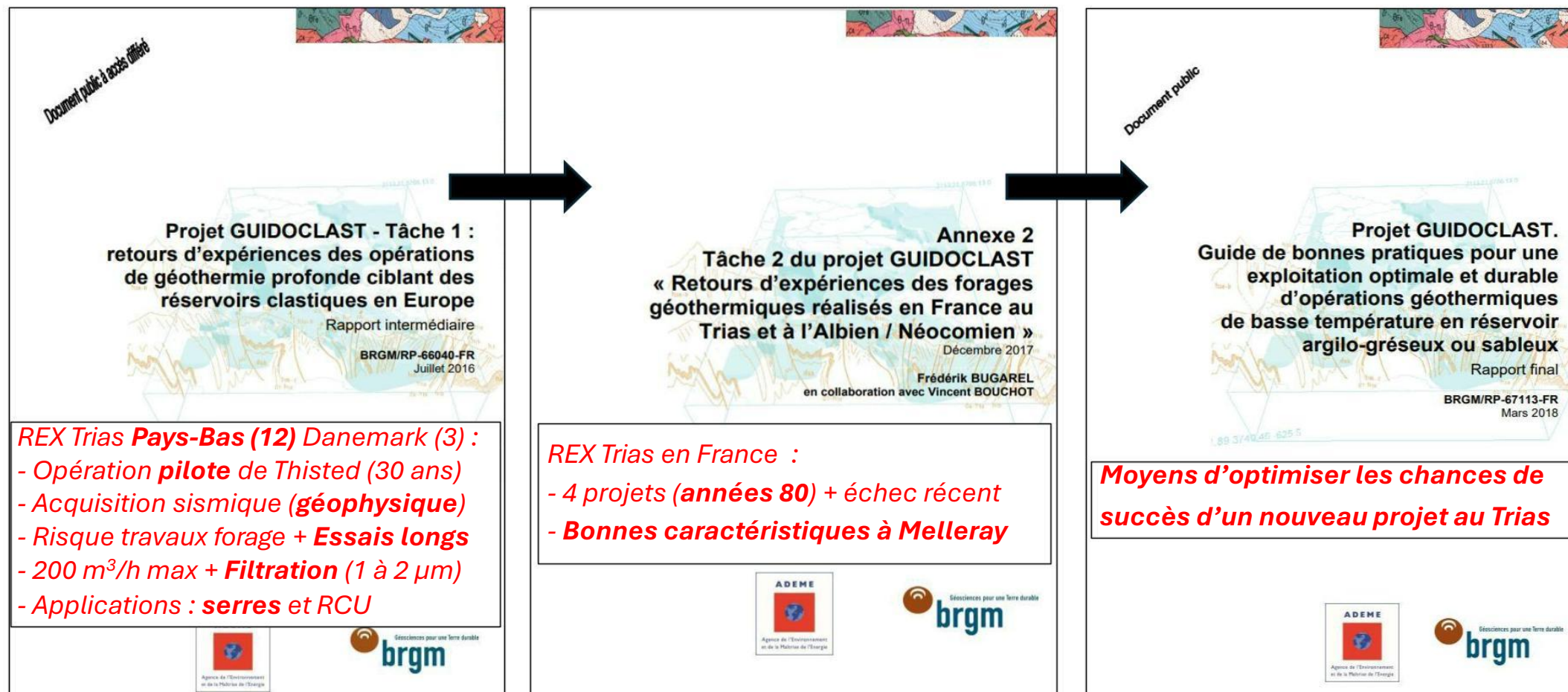


2.4 Retour d'expérience du forage géothermique de Melleray

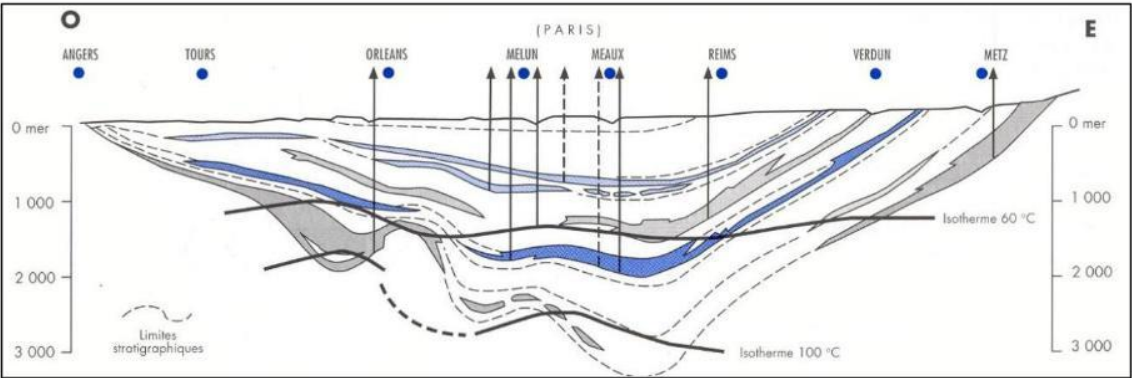
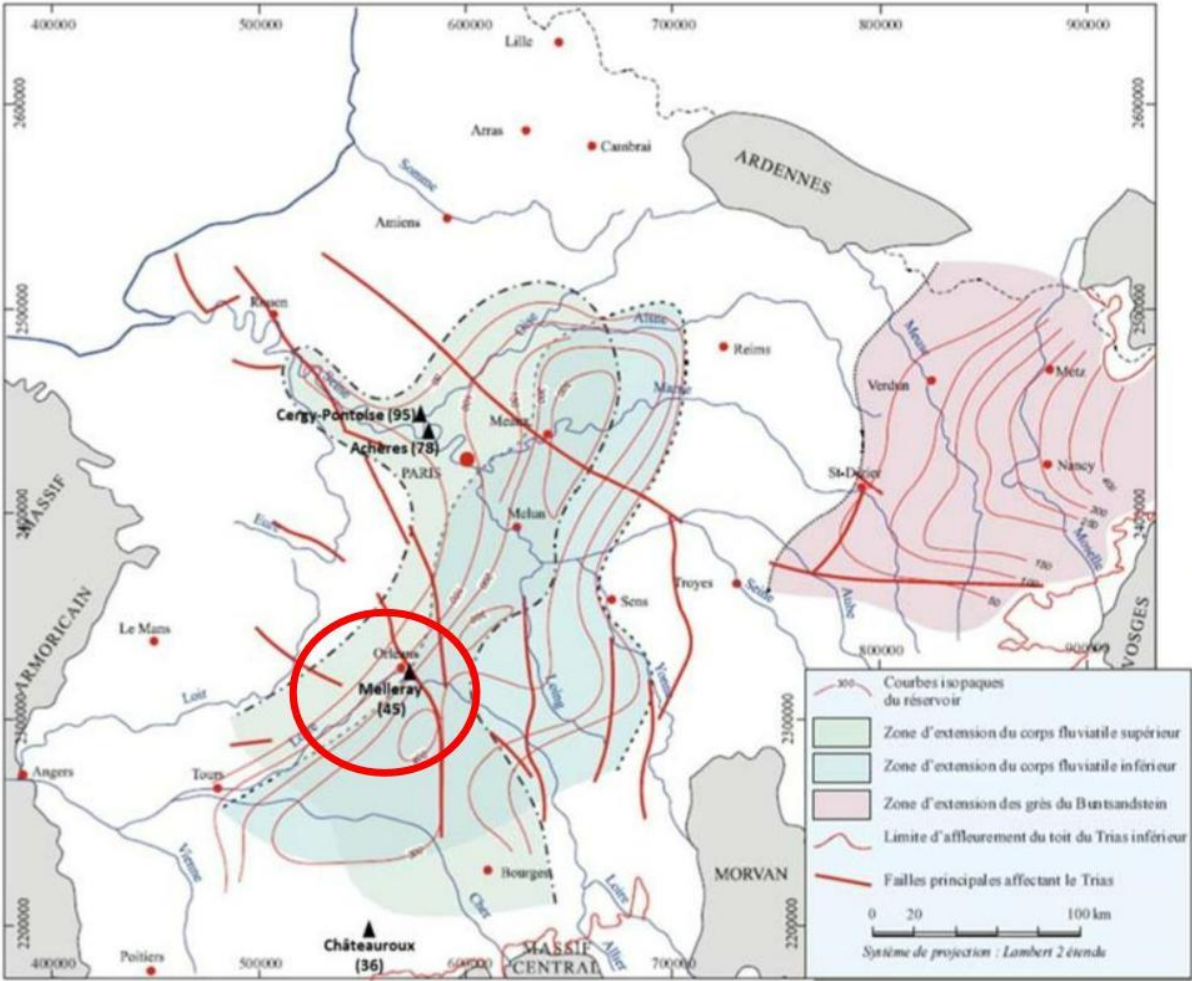


1. **Le projet GUIDOCLAST (REX Trias en France et en Europe / Guide de bonnes pratiques)**
2. **Les projets géothermiques au Trias en France (années 80)**
3. **Le doublet de Melleray (application serres)**
4. **Principaux enseignements de l'exploitation du doublet de Melleray**

1. Le projet GUIDOCLAST (conventions ADEME/BRGM 2016 et 2017)



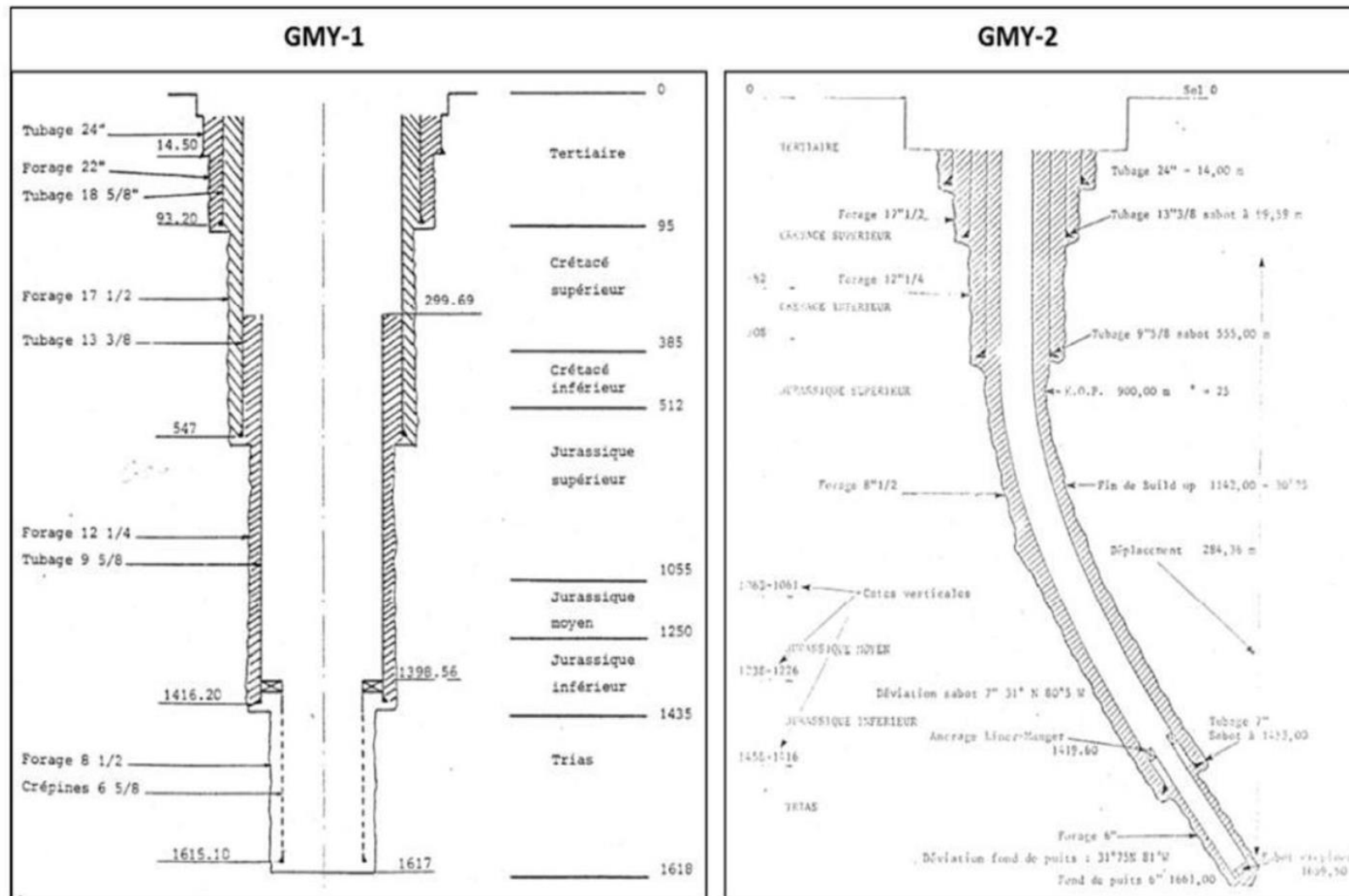
2. REX des projets géothermiques au Trias en France



Opération	Profondeur (m)	Température (°C)	Transmissivité (D.m)	Epaisseur totale / utile (m)	Années
Melleray	1436	74	15,5	182 / 36	1979/1980
Cergy-Pontoise	1940	77	-	33	1980
Achères	1890	78	11,2	67 / 15	1982
Châteauroux	455	32	-	201 / 20	1983

Bonnes caractéristiques à Melleray

3. Le doublet de Melleray au Trias



- Délai de 1 an entre les 2 forages
- **Pas d'acquisition de sismique nouvelle** (position et rôle de la faille de Sennely)

Puits producteur GMY-1:

- Vertical, chambre de pompage 300 m
- **OH 8"1/2 avec crépines INOX 6"5/8**
- **Test Dogger nég. (fort ROP après)**
- Stimulation (Hexamétaphosphate)
- Développement 7j (skin positif)
- Pression en tête 6,5 bars
- Indice de productivité de 10 m3/h/bar
- Débit de 175 m3/h
- Rabattement de 200 m
- Salinité élevée de 36 g/L

Puits injecteur GMY-2:

- Déviés (23°)
- **OH de 6" avec crépines INOX 4"1/2**

Doublet:

- Ecartement: 1050 m au réservoir
- Ouverture crépines: 0,8 mm
- **Pas de massif filtrant**

4. Principaux enseignements de l'exploitation du doublet de Melleray

D'un point de vue stratégique, les trois éléments ci-dessous sont à retenir :

- **L'échec relatif de ce projet industriel** visant à alimenter des serres **a causé un grave préjudice au Maître d'ouvrage, mais aussi à l'ensemble de la filière**, en particulier sur la région d'Orléans où, malgré de bonnes caractéristiques du réservoir (transmissivité de l'ordre de 13 à 15 D.m et température de 79°C), plus aucun projet de géothermie profonde n'a vu le jour depuis plus de trente ans. Ce point souligne **la nécessité de trouver des moyens permettant de réduire l'impact négatif d'un échec prévisible** compte tenu du caractère exploratoire de ce type d'opération.
- **En termes de structuration du projet**, le doublet de Melleray a été réalisé pour le compte d'un groupement d'intérêt économique (GIE Géoval) qui fédérait différents exploitants des serres. **Cette organisation a eu une incidence sur la gestion du projet par des délais relativement longs dans les prises de décisions d'ordre technique, et des conséquences économiques négatives** comportant notamment des pertes d'exploitation supplémentaires liées à des consommations de fuel (Boisdet et al., 1989). **Cet aspect organisationnel est donc à prendre en compte en amont du projet afin de faciliter le déroulement des opérations et optimiser les chances de succès.**
- L'absence d'une étude géophysique préalable n'a pas permis de préciser la structure géologique au droit du site de Melleray et en particulier la position de la faille de Sennely (accident tectonique majeur du Bassin Parisien). D'autre part, l'anomalie relative au comportement hydraulique du réservoir, révélée lors des essais de production du puits injecteur GMY-2, n'a pas été clairement identifiée (nature multi-couche du réservoir ou variation latérale de faciès, comportement hydraulique de la faille de Sennely ?). Ces points soulignent **la nécessité d'études complémentaires en amont du projet (sismique) et en fin d'opération de forage (essais hydrogéologiques) afin d'améliorer la connaissance du réservoir cible pour optimiser les chances de succès de l'exploitation.**

- Anticiper les solutions de repli
- **Garantie SAF Environnement (segment 2 ?)**

- Veiller à la cohérence du projet

- Etude de dérisking (acquisition sismique)
- Améliorer la connaissance du réservoir

4. Principaux enseignements de l'exploitation du doublet de Melleray

D'un point de vue technique, la conception du doublet de Melleray fait apparaître des choix techniques forts, portant notamment sur :

- L'affectation de la fonction des puits producteur et injecteur (déterminée par la réalisation de la chambre de pompage) avant la réalisation des travaux et des essais.
- La réduction des diamètres des tubages et de la complétion du puits injecteur suite aux résultats encourageants du premier puits producteur.
- L'absence de massif filtrant au niveau de la complétion du réservoir.

Ces choix techniques ont très probablement réduit les chances de succès de l'opération de Melleray compte tenu notamment de la très forte sensibilité de la pression d'injection par rapport à la valeur de l'indice d'injectivité. Une valeur d'indice de 4 m³/h/bar légèrement supérieure à celle mesurée au puits injecteur GMY-2 (2 m³/h/bar) aurait potentiellement permis de fonctionner au débit d'exploitation prévisionnel de 150 m³/h, avec une pression d'injection de l'ordre de 37,5 bars nettement inférieure à la pression de 58 bars limitant le débit à 110 m³/h.

Ces points soulignent la nécessité de **conserver une flexibilité relative à l'affectation de la fonction des puits** (producteur, injecteur) suivant les caractéristiques hydrogéologiques les plus favorables du réservoir, et de **prévoir une complétion au diamètre le plus grand possible** (réduction des pertes de charge) **équipée d'un massif filtrant**.

- Architecture de puits (conception)

- Injectivité (risque principal)

Réf : Annexe 2 du rapport GUIDOCLAST (BRGM/RP 67113-FR – Mars 2018)

4. Principaux enseignements de l'exploitation du doublet de Melleray

Ces points soulignent la nécessité de :

- **Sensibiliser le personnel d'exploitation vis-à-vis des modifications du régime de débit**, en respectant un principe de précaution lors des opérations de redémarrage et d'arrêt des installations (procédures à définir) afin d'éviter les changements brutaux (coup de bélier). Ce problème persiste néanmoins en cas de pannes subites des pompes équipant la boucle géothermale.
- **Prévoir si possible une implantation des têtes de puits les plus proches possibles de la centrale géothermique** afin de limiter les longueurs de canalisation, sachant que le principe de traitement chimique continu contre les phénomènes de corrosion est aujourd'hui généralisé à l'ensemble des exploitations du Dogger. La nature du traitement resterait néanmoins à être adaptée au fluide du Trias.
- **Prévoir financièrement une opération de décolmatage, voire de reprise de la complétion, en cas de forte dégradation des caractéristiques hydrauliques des puits ou d'avarie importante.**

- *Opération pilote*

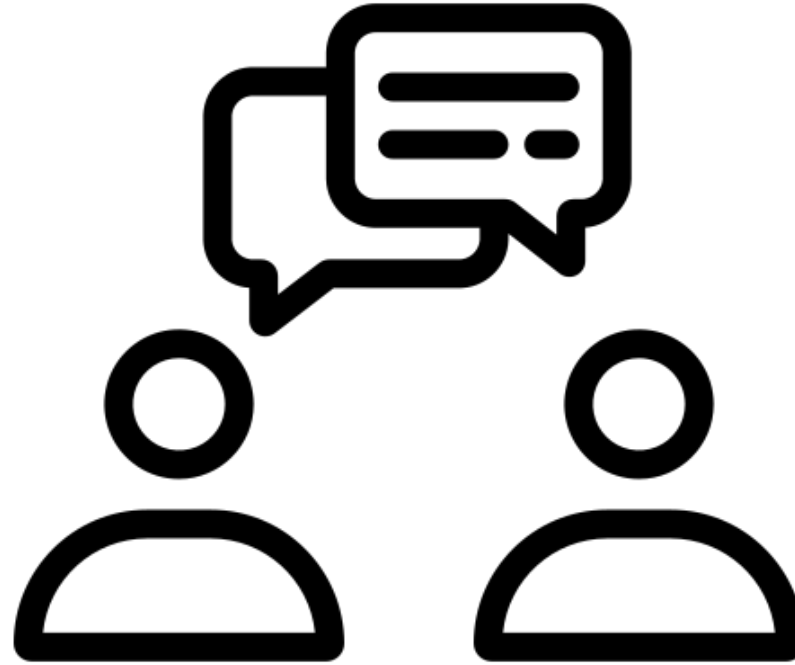
- *Installations de surface (conception)*
- *Traitement du fluide*

- *Complétion / dimensionnement des crépines (conception)*
- *Opération de rétro-lavage*

Réf : Annexe 2 du rapport GUIDOCLAST (BRGM/RP 67113-FR – Mars 2018)

3. Questions / échanges

Et maintenant à vous la parole...



4. Co-construction de l'argumentaire



- Quelle forme pour l'argumentaire (guide d'aide à la décision, brochure, fiches synthétiques) reprenant les principaux éléments clés d'un projet de géothermie profonde ?
- Différents exemples de guides existent déjà pour la géothermie de surface coédités par l'ADEME et le BRGM:

Dans la même collection

*Pour le secteur
sanitaire et médico-social*



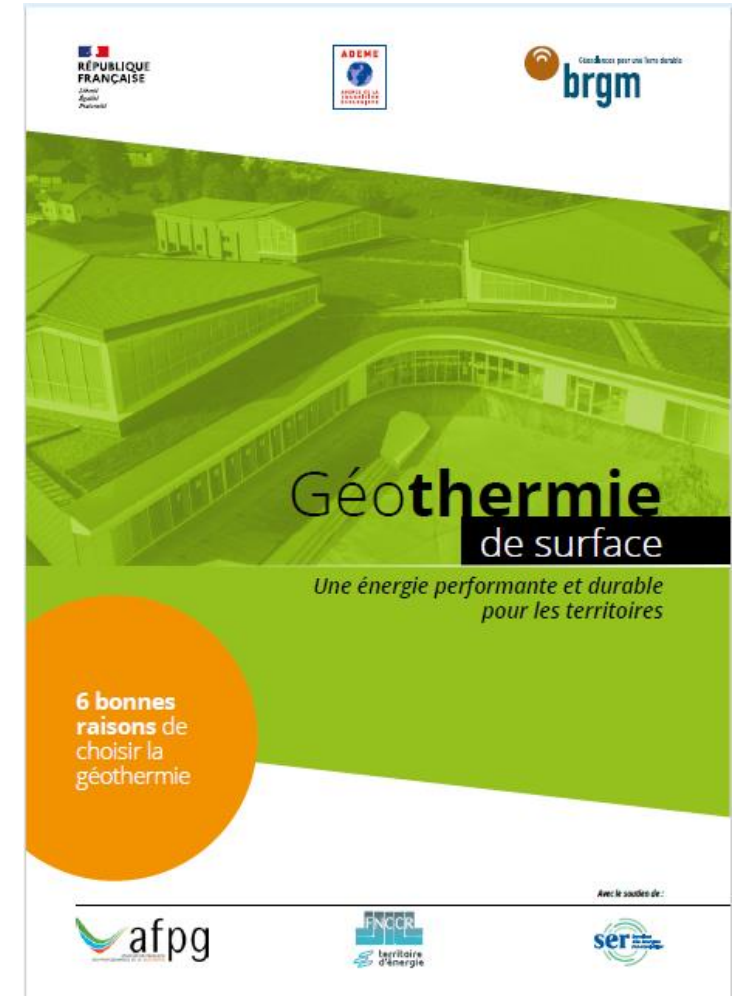
*Pour les centres
aquatiques*



Pour les entreprises



Disponibles sur <https://www.geothermies.fr/outils/les-guides>



4. Co-construction de l'argumentaire



Sur le plan énergétique, les territoires sont confrontés à un défi majeur : maîtriser et planifier les besoins en énergie de leur population, en réduisant les émissions de CO₂ à un coût raisonnable. A quelques mètres sous nos pieds, se trouve un élément de solution : la géothermie ! Le sous-sol offre en effet une énergie renouvelable, continue et capable, avec un même dispositif, de produire du chaud et du froid.

Ce livret concerne la géothermie de surface, l'énergie que l'on exploite jusqu'à 200 mètres de profondeur. Au-delà, la géothermie profonde permet notamment d'alimenter des réseaux de chaleur ou même de produire de l'électricité mais elle n'est exploitable que sur une partie du territoire en fonction de la nature du sous-sol. La géothermie de surface, en revanche, est disponible presque partout. Son principe est simple : capter l'énergie du sous-sol et la restituer au niveau de température désiré par le biais d'une pompe à chaleur (PAC) géothermique.

La géothermie de surface apporte des solutions thermiques à des bâtiments allant de la maison individuelle à l'éco-quartier, aussi bien pour la rénovation que la construction neuve. Elle permet également la production d'eau chaude sanitaire et répond à des besoins industriels (par exemple séchage de bois) et agricoles (chauffage de serres notamment). C'est une énergie durable, locale, disponible en continu, quelles que soient les conditions climatiques et qui n'a pas d'impact sur les paysages.

La géothermie, c'est aussi du froid !

La stabilité des températures du sous-sol au cours des saisons permet de produire aussi bien du chaud que du froid.

En hiver, la chaleur prélevée dans le sol sert à chauffer le bâtiment. En été, la fraîcheur du sous-sol peut refroidir/rafraîchir les constructions. Ces usages présentent l'avantage de « recharger » thermiquement le sous-sol et ainsi d'augmenter la performance des installations pour la saison suivante.

Deux possibilités permettent d'abaisser les températures des bâtiments, neufs ou à rénover :

- La production de froid actif. Avec des émetteurs adaptés, un système équipé de pompes à chaleur réversibles produit de la climatisation.
- La production de frais, par « géocooling ». La température du sous-sol est suffisamment basse pour rafraîchir directement et naturellement le bâtiment, améliorant ainsi le confort d'été. Un simple échangeur de chaleur suffit à alimenter le circuit des émetteurs. La pompe à chaleur n'étant pas sollicitée, cela rend cette solution particulièrement économique.

Cette opportunité de produire du froid ou du frais renouvelable est indispensable pour certains établissements (EHPAD, hôpitaux...) et à propos dans le contexte du réchauffement climatique.

Ce numéro a fait l'objet d'une réimpression en 2023, avec une actualisation de la partie réglementaire. Pour rester cohérent avec les exemples cités, ni les prix des énergies (gaz et électricité qui ont augmenté en 2022), ni les niveaux d'émissions de CO₂ associées aux différentes énergies n'ont été modifiés. Ces deux éléments renforcent les atouts de la géothermie.

6 bonnes raisons de choisir la géothermie :

1. Une facture énergétique maîtrisée.....
2. L'exemplarité environnementale
3. La promotion des ressources locales
4. Une énergie adaptable pour anticiper les futurs défis
5. Une énergie qui s'intègre harmonieusement à son environnement
6. Une technologie qui a fait ses preuves



4. Co-construction de l'argumentaire



RAISON 1 Le choix d'une facture énergétique maîtrisée

Des coûts d'exploitation stables et réduits



Comparée aux énergies conventionnelles (gaz, électricité, fioul), la géothermie demande un investissement initial supérieur (coût des échangeurs enterrés notamment). En revanche, ses coûts d'exploitation sont réduits. Ils se composent des coûts d'entretien de l'installation et de la consommation d'électricité de la pompe à chaleur (PAC) et de ses auxiliaires.

On considère en moyenne que pour 1 kWh électrique consommé par la pompe à chaleur (PAC), 4 kWh thermiques sont restitués. Le rapport entre ces deux valeurs est le coefficient de performance (COP). Il est estimé en moyenne à 4. Le budget de fonctionnement affiche ainsi une réduction des trois quarts de la facture énergétique.

Cette moindre dépendance à l'énergie fossile se traduit aussi par une stabilité des coûts. La facture énergétique de bâtiments alimentés par du gaz, de l'électricité ou du fioul sera financièrement fortement impactée par l'évolution du prix des énergies traditionnelles. Cela aura moins de conséquences pour une installation géothermique, dont environ les trois quarts des besoins thermiques sont couverts par une énergie gratuite et locale prélevée dans le sous-sol. La visibilité financière ainsi obtenue rend la planification plus aisée.

(1) Certaines pompes à chaleur fonctionnent au gaz, mais cela reste marginal.

Centre Aquatique de Saint-Amand-les-Eaux (59)

« La géothermie affiche un coût de fonctionnement annuel de 60 995 € HT contre 131 065 € HT pour l'option chauffage gaz. Quant aux émissions annuelles de CO₂, elles sont de 56 tonnes pour une PAC et de 800 tonnes par an avec un chauffage au gaz. La solution géothermique est donc très intéressante sur le plan économique comme sur celui du respect de l'environnement. »

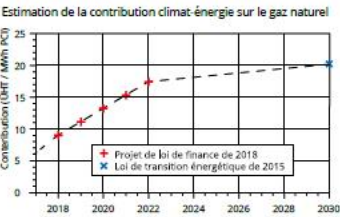
Franck BAUDOUX, Directeur Général de la S.P.L. du Centre Aquatique Intercommunal de l'Amandinois

Usage	Assure les 2/3 des besoins de chaleur de locaux de 3 462 m ² dont 975 m ² d'eau (2 bassins). L'eau prélevée alimente une partie des bassins.
Installation achevée en 2016	3 forages sur aquifère (2 de pompage, 1 de réinjection) à 40 m de profondeur. Le COP de la PAC est de 4,25.
Coûts d'investissement	275 000 € de surcoût lié à la géothermie.
Coûts de fonctionnement (annuels)	60 995 € HT dont 11 700 € d'entretien et 45 200 € d'électricité pour la PAC. 70 070 € HT d'économie annuelle par rapport à une solution gaz (en citerne, pas de réseau de gaz de ville).
Temps de retour sur investissement	4 ans.
Gain environnemental	744 tonnes équivalent CO ₂ évitées par an.

La géothermie : une énergie compétitive

Ces coûts d'exploitation réduits permettent à la géothermie de surface d'être une énergie compétitive dans le temps. En moyenne, le temps de retour sur investissement de ces installations est de 8 à 13 ans⁽¹⁾. Une fois l'investissement amorti, il ne reste qu'à s'acquitter des coûts d'exploitation réduits, et ce pendant plusieurs décennies (la durée de vie des forages est estimée à 50 ans⁽²⁾, celle des pompes à chaleur, moins coûteuses que ces derniers, à 17 ans⁽³⁾).

De leur côté, les énergies fossiles, polluantes et épuisables, seront toujours caractérisées par un marché volatil et l'augmentation de leur taxation par le biais de la contribution climat énergie.



Dans certains cas, les installations géothermiques peuvent se révéler particulièrement compétitives :

- lorsque le système procure à la fois du chaud et du froid/frais. Avec la géothermie de surface, ces besoins sont assurés par une seule et même installation avec de plus des performances améliorées en raison du phénomène de « recharge » thermique évoqué précédemment ;
- lorsque le bâtiment que l'on souhaite équiper se situe au droit d'une ressource très favorable (par exemple, un aquifère peu profond et très productif, des roches très conductrices de chaleur et faciles à forer...);
- en l'absence de servitude par un réseau de gaz.

(2) Géothermie assistée par pompe à chaleur, étude technico-économique, Association Française des Professionnels de la Géothermie (AFPG), 2014, selon les technologies.

(3) Géothermie assistée par pompe à chaleur, étude technico-économique, Association Française des Professionnels de la Géothermie (AFPG), 2014.

(4) Hypothèse retenue dans les fiches des certificats d'économie d'énergie



Espace des Mondes Polaires, Prémamanon (39)

« L'Espace des Mondes Polaires a fait le choix de la géothermie par rapport à une solution de chauffage au fioul pour des raisons évidentes de cohérence avec le message environnemental qu'il porte (140 tonnes de CO₂ rejetées en moins chaque année). Par ailleurs, les études préalables mettaient en avant une économie annuelle de 30 000 € sur les charges de chauffage, couvrant ainsi en six années le surcoût de 190 000 € induit par l'installation de cette solution. »

Bernard MAMET, Président de la Communauté de communes de la Station des Rousses

Usage	Production de chaud pour une surface de 5000 m ² (patinoire, musée, auditorium, restaurant neufs).
Installation achevée en 2016	16 sondes verticales de 100 m de profondeur, espacées de 10 m, COP de 5,5 grâce à la récupération de la chaleur des installations qui produisent le froid pour la patinoire.
Coûts d'investissement	Liés à la géothermie : 280 000 €, avec un surcoût par rapport à une installation fioul de 190 000 €.
Coûts de fonctionnement (annuels)	16 428 € HT de consommation de la PAC. 33 572 € HT d'économie par rapport à une solution fioul.
Temps de retour sur investissement	6 ans.
Gain environnemental	140 tonnes de CO ₂ évitées par rapport à une solution fioul.

Données techniques :
Guillaume BARTHÉ, Directeur Pôle Fluides/Electricité, Synapse construction

4. Co-construction de l'argumentaire



RAISON 2 Le choix de l'exemplarité environnementale



Une énergie verte

On considère que les installations de géothermie de surface rejettent, en moyenne, moins de 45 g de CO₂ par kWh de chauffage (émissions associées à la consommation électrique de la pompe à chaleur)⁽⁵⁾. C'est environ 4 fois moins que l'électricité, 5 fois moins que le gaz naturel et 7 fois moins que le fioul pour satisfaire un même besoin de chauffage.

Disponible localement, la géothermie de surface n'implique pas de transport. En effet, la géothermie, par nature, est consommée là où elle est produite. Ce sont donc autant d'émissions de CO₂ et de particules fines qui sont évitées. Cela en fait un véritable atout pour la qualité de l'air des territoires.

Son usage, encadré par la réglementation et mis en œuvre par des professionnels qualifiés, se fait dans le respect de l'environnement et de la biodiversité, dans le sous-sol et en surface.

Cette énergie renouvelable contribue au déploiement des Bâtiments Bas Carbone (BBCA) et de Haute Qualité Environnementale (HQE).

(5) Hypothèse d'un COP à 4. Valeurs pour kgCO₂/kWh issues de la base de données carbone de l'ADEME :
• électricité usage chauffage 2016 : 0,169 kgCO₂/kWh
• gaz naturel 0,244 kgCO₂/kWh PCI
• fioul 0,312 kgCO₂/kWh

Résidence Grand Parei, éco-hameau des Boisses, Tignes 1800 (73)

« Nous avons choisi la géothermie parce que c'est une énergie renouvelable. Elle nous fait éviter 90 tonnes d'émission de CO₂ par an. Elle nous apparaît comme la meilleure source de chaleur en montagne, notamment parce que :
• nous tenons à limiter le trafic routier, qui produit des émissions importantes de gaz à effet de serre et engorge les routes en saison hivernale. Ainsi, un approvisionnement en fioul, gaz ou bois n'est pas souhaitable. Pour une cuve de 5 000 litres il faut compter 7,5 livraisons par an. La géothermie a l'avantage d'utiliser la ressource sur site.
• l'accumulation de la neige sur les toits et la présence de masques solaires importants rendent l'option intéressante du solaire plus difficile en montagne. L'expérience de cette première opération nous permet d'en préparer une seconde. »

Baptiste AUBAILLY,
Chef de projet à la Société d'Aménagement de la Savoie

Usage	Chauffage de 32 logements (2 341 m ² de surface de plancher) Besoins estimés à 300 MWh/an.
Installation achevée en 2015	PAC raccordée à 36 sondes géothermiques de 100 m de profondeur, appoint électrique. PAC : 130 kW de puissance, COP de fondre de 3.
Coûts d'investissement	Liés à la géothermie : 180 000 € pour les forages et 90 000 € HT pour la chaufferie. 60 000 € de subvention de l'ADEME.
Temps de retour sur investissement	Estimé à 15 ans par rapport à une solution fioul avec subvention.
Gain environnemental	90 tonnes équivalent CO ₂ évitées par an.

Données techniques : Yves MOLLIER-PIERRET, Directeur de l'entreprise Weisaupt

Un engagement pour lutter contre le changement climatique

Aux côtés des autres sources d'énergie renouvelables, la géothermie de surface est essentielle à l'atteinte des objectifs de la Loi de Transition Énergétique pour la Croissance Verte (LTECV) qui fixe un objectif de 38 % d'énergies renouvelables dans la consommation finale de chaleur à l'horizon 2030, contre 20,4 % à fin 2016⁽⁶⁾.

Alors que certains pays européens ont su valoriser la géothermie de surface dans leur mix énergétique, il reste en France un très fort potentiel de développement. La mobilisation sans réserve de toutes les énergies renouvelables est nécessaire pour s'adapter au changement climatique. La géothermie de surface présente de réels atouts. Pour les collectivités territoriales, stratégies énergétiques, animateurs des dynamiques locales et maîtres d'ouvrage, c'est une énergie incontournable à mieux considérer.

(6) La révision en cours de la programmation pluriannuelle de l'énergie devrait fixer des objectifs plus ambitieux.

TEMOIGNAGE

La Région Centre-Val de Loire

« La Région Centre-Val de Loire soutient la filière géothermie depuis 2008. Elle cofinance avec l'ADEME les missions d'un animateur régional géothermie. Des dispositifs incitatifs ont été créés à destination des particuliers (« Mon confort géothermie »), des collectivités territoriales (via les Contrats Régionaux de Solidarité Territoriale et Contrats d'Objectif Territorial de développement des énergies renouvelables thermiques) mais aussi pour des démonstrateurs dans le cadre d'appels à projets FEDER. Notre stratégie est de capitaliser sur l'existant, opérations réalisées et professionnels formés, pour accélérer le déploiement de la géothermie et en faire un pilier de notre bouquet d'énergies renouvelables. »



Stéphanie MARECHAL,
Chargée de mission Service Transition Énergétique,
Région Centre-Val de Loire

Le SIEML

« Le SIEML agit pour favoriser le développement optimal des énergies renouvelables dans le Maine-et-Loire. Devant le peu de données disponibles sur le potentiel géothermique du département, nous avons décidé de mener une étude spécifique en partenariat avec le BRGM et la communauté de communes Loire Layon Aubance qui bénéficie d'une situation géologique favorable.

L'objectif est d'approfondir notre connaissance de la filière pour intégrer pleinement la géothermie dans la stratégie énergétique du territoire. Cela devrait permettre de valoriser judicieusement cette énergie propre et de favoriser l'émergence de projets opérationnels. »



Jean-Louis ROUX,
Vice-président du Syndicat Intercommunal d'Énergie de Maine-et-Loire, en charge des énergies renouvelables et de la maîtrise de la demande en énergie

4. Co-construction de l'argumentaire



RAISON 3 Le choix de la promotion des ressources locales

Une énergie disponible en permanence sur presque tout le territoire

La géothermie de surface est une énergie disponible en continu presque partout.

D'un point de vue réglementaire, la réalisation d'une installation de géothermie de Minime Importance (GMI) nécessite une simple déclaration sur environ 83 % du territoire métropolitain (zones « verte »), accompagnée dans certains cas d'un avis d'expert agréé (zones « orange », entre 14 et 15 % du territoire). Sur les 2% du territoire restants (zones « rouge ») la réalisation des installations de géothermie ne s'inscrit pas dans le régime de la GMI et doit faire l'objet d'une demande d'autorisation.

Au-delà des aspects réglementaires⁽⁷⁾, qui attestent de la volonté administrative de faciliter le recours à la géothermie de surface, le bon dimensionnement de l'installation nécessite de connaître la ressource géothermique. Des cartes d'estimation de ressources et de potentiels sont disponibles en ligne (https://www.geothermies.fr/viewer?af=autolayer_resource_surface) et permettent une première approche, sur un point donné.



Carte réglementaire nationale de la géothermie de minime importance sur sondes géothermiques verticales à 200 m de profondeur
● Télédéclaration ● Télédéclaration + avis d'expert ● Dossier d'autorisation code minier

Une énergie de mon territoire pour mon territoire

La géothermie est une énergie locale. Elle n'implique donc pas de transport, pas de gestion de stocks. En s'émancipant des énergies fossiles, elle favorise l'indépendance énergétique des territoires. Elle mobilise les talents locaux : bureaux d'études, foreurs, installateurs... et contribue à l'emploi de proximité. La géothermie est l'occasion de rappeler que les potentiels d'un territoire ne s'arrêtent pas en surface et comprennent aussi l'usage de son sous-sol.

Atlas régional des ressources du Limousin (sur sondes)



Conductivité thermique moyenne (W/mK) sur 200 m de profondeur
Représentation par mailles 250 x 250 m



(7) Exemple d'une installation sur sondes à 200 m en mai 2023. En fonction de la technologie, de la profondeur et de la date de la recherche, les résultats peuvent être différents.

(8) Se référer à l'article 22-6 du décret n°2006-649 du 2 juin 2006 modifié <https://www.legifrance.gouv.fr/loda/id/JORFTEXT00000609345>.

(9) Pour une vision complète de l'encadrement normatif et réglementaire de la géothermie de surface, voir <https://www.geothermies.fr/accompagner-votre-projet/decouvrir>. Les installations qui ne relèvent pas de la GMI font l'objet d'une demande d'autorisation.



TEMOIGNAGE

Siège de la Communauté des Communes de la Région de Suippes (51)

« La Communauté de Communes a engagé un programme d'investissement important comprenant la construction de deux écoles, de son siège et projette une extension de la maison de retraite.

En l'absence de réseau de gaz, le choix du mode de chauffage s'est très rapidement orienté vers des systèmes géothermiques. La décision a été prise considérant les nombreux avantages de la solution :

- maîtrise de la technologie par des artisans locaux ;
- facilitant l'installation, l'entretien et la maintenance ;
- énergie locale donc absence de problème et de gestion des approvisionnements ;
- confort et facilité d'usage ;
- maîtrise du coût de fonctionnement ;
- réduction des émissions de CO₂ ;
- retour rapide sur investissement. »

Emmanuel JACQUEMIN, Directeur général des services,
Communauté des Communes de la Région de Suippes

➤ Usage	Chauffage d'un bâtiment RT 2012 d'une surface de 1134 m ² . Besoins thermiques estimés à 147 MWh/an.
➤ Installation	15 sondes verticales de 100 m de profondeur espacées achevée en 2011 de 10 m, PAC de 78 kW de puissance avec un COP de 3,7.
➤ Coûts	Légs à la géothermie : 118 620 € (forage, PAC, monitoring).
➤ Investissement	46 600 € de subvention ADEME.

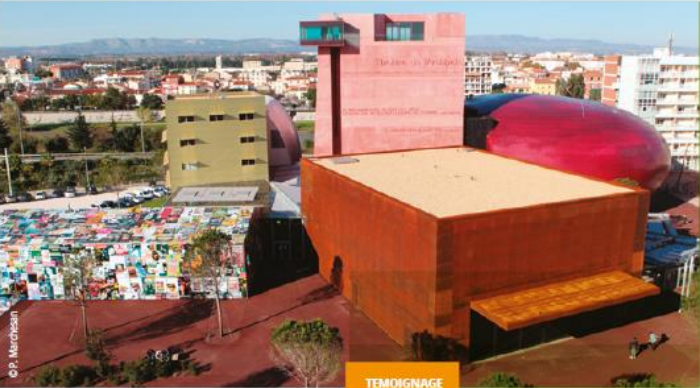


RAISON 4

Le choix d'une énergie adaptable pour anticiper les futurs défis

Relever le défi de l'augmentation des températures : du froid/frais quasi-gratuit

La France fait face à des étés de plus en plus chauds. En effet, en 2017 et 2018, de nombreux centres urbains ont subi des vagues de chaleur jamais enregistrées depuis le début des mesures en 1872, en atteignant des températures supérieures à la normale de 1,5 °C. Les besoins en climatisation/rafraîchissement augmentent ainsi rapidement.



Pour construire aujourd'hui des bâtiments qui répondront aux exigences de demain et favoriser le confort, la géothermie est une énergie renouvelable particulièrement adaptée : elle produit du froid actif (avec une pompe à chaleur réversible) ou du frais (par géocooling) à un prix très compétitif. Sous réserve de disposer d'émetteurs adaptés, c'est le même système géothermique, équipé d'une pompe à chaleur réversible, qui produit du froid actif et du chaud. Avec le géocooling, 1 kWh d'électricité consommée⁽¹⁾ peut produire jusqu'à 50 kWh de frais !

Cette production de froid ou de frais permet d'éviter l'utilisation de climatiseurs, fortement consommateurs d'électricité et qui contribuent, par leurs rejets d'air chaud, aux phénomènes d'îlots de chaleur.

(10) La pompe à chaleur ne fonctionne pas, ce sont des équipements secondaires, le circulateur et la pompe hydraulique, qui sont actifs.

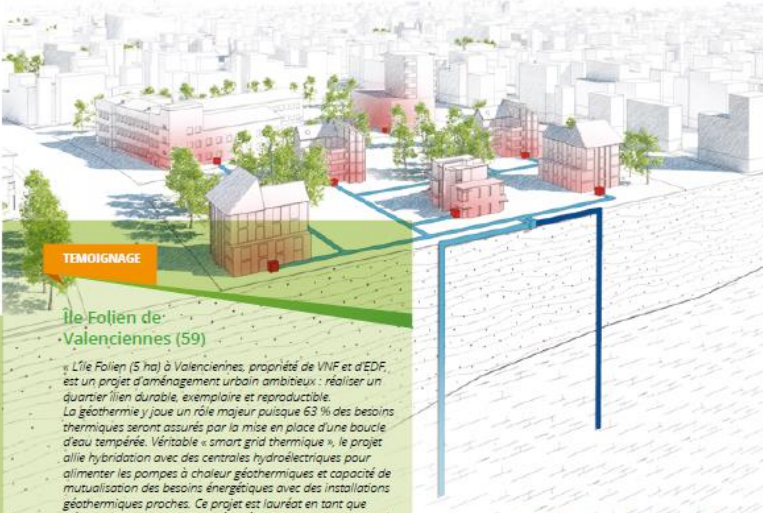
TEMOIGNAGE

Théâtre de l'Archipel, Perpignan (66)

« La Ville de Perpignan a choisi de climatiser les salles du Théâtre de l'Archipel dans le but essentiel de préserver un confort pour les spectateurs, mais aussi de prévenir le réchauffement climatique dont l'évocation lors des études va en s'amplifiant aujourd'hui et cette anticipation nous rassure. D'autant que le choix de la géothermie repose sur la proximité de nappes phréatiques qui a permis de forer avec un débit et une température régulés. »

Michel RAMONET, Directeur, Direction travaux neufs patrimoine bâti, Mairie de Perpignan

- Usage : Chauffage et rafraîchissement de deux salles de spectacle (1100 et 1000 places), d'un plateau de répétition, d'un bâtiment administratif, d'une verrière pour l'accueil du public et d'un bâtiment technique. Estimation de la consommation annuelle de chauffage : 275 MWh, de froid : 252 MWh.
- Installation achevée en 2011 : Deux forages sur aquifère (16 m de profondeur). Deux PAC de 280 kW de puissance.
- Coûts d'investissement : Liés à la géothermie : 500 000 €.



TEMOIGNAGE

Île Folien de Valenciennes (59)

« L'île Folien (5 ha) à Valenciennes, propriété de VNF et d'EDF, est un projet d'aménagement urbain ambicieux : réaliser un quartier d'habitat durable, exemplaire et reproductible. La géothermie y joue un rôle majeur puisque 63 % des besoins thermiques seront assurés par la mise en place d'une boucle d'eau tempérée. Véritable « smart grid thermique », le projet allie hybridation avec des centrales hydroélectriques pour alimenter les pompes à chaleur géothermiques et capacité de mutualisation des besoins énergétiques avec des installations géothermiques proches. Ce projet est innovant en tant que Démonstrateur Industriel et déclaré innovant dans le cadre de la REV 3 de la Région des Hauts de France. »

Bruno TIRMANT, Responsable Aménagement, Voies Navigables de France

- Usage : Chauffage, rafraîchissement, eau chaude sanitaire pour un quartier durable de 47 000 m². Sa performance énergétique devra tendre au-delà de la norme RT 2012 (objectif RT 2012 moins 15 %). La géothermie couvrira 63 % des besoins thermiques. Le projet sera mené en 3 phases.
- Installation en projet : 3 forages sur aquifère prévus. Deux forages sont déjà réalisés (12 m de profondeur, débit exploitable 200 m³/h). Les eaux extraites pourront être directement rejetées dans l'Escaut⁽¹⁾. Un réseau d'eau tempérée sera déployé. Les groupes de bâtiments seront équipés de sous-stations thermiques (échangeurs et pompes à chaleur).
- Hybridation : Les besoins en électricité des pompes à chaleur pourront être en partie assurés par de l'hydroélectricité (produite à partir de l'Escaut avec un projet de turbines génératrices d'électricité dans l'écluse et une microcentrale électrique sur une chute d'eau).
- Coûts d'investissement : Pour la phase 1, liés à la géothermie : 1 484 000 € (forages et réseaux eaux de nappe, réseau d'eau tempérée, production de chaleur), subventions prévisionnelles de 20 %.
- Modèle économique (annuel) : Facturation sur la base d'une part fixe (abonnement : 143 471 € /kW) et d'une part variable (consommations : 37 471 € /MWh). Pour un équivalent logement cela représente 697 471 € TTC incluant :
 - Chauffage, ECS, rafraîchissement
 - Maintenance et gros entretien
 - Renouvellement des équipements
 - FinancementLe coût TTC de la chaleur vendue est identique à celui d'une installation au gaz naturel respectant des objectifs environnementaux similaires.
- Gain environnemental : Zéro émission de CO₂ en local.

Principe d'une boucle d'eau tempérée géothermique sur nappe ©BRGM

La géothermie : un composant clé du Smart Grid thermique

Répondre aux exigences de la ville durable implique détermination et créativité. Parce qu'elle est complètement adaptable, la géothermie de surface est un atout.

La boucle d'eau tempérée en est une bonne illustration. Un réseau d'eau à une température proche de celle de la ressource naturelle (environ 15°C) alimente autant de pompes à chaleur qu'il y a de bâtiments à chauffer/refroidir. Sur un principe de mutualisation des coûts et des bénéfices, cela peut permettre :

- un usage de la géothermie en mix avec d'autres énergies renouvelables et de récupération,
- une gestion optimisée sur un mode « smart grid »,
- une évolutivité du réseau et un lissage des investissements.

Cela s'avère d'autant plus pertinent si les besoins de froid et de chaud sont simultanés.

(11) Ce procédé a fait l'objet d'une déclaration au titre de la Loi sur l'Eau, validée par la Direction Départementale des Territoires et de la Mer.

4. Co-construction de l'argumentaire



RAISON 5

Le choix
d'une énergie qui s'intègre
harmonieusement à son environnement

Une énergie renouvelable économe d'espace

Au moment des travaux de forage, le terrain doit être accessible et dégagé. Une fois les forages réalisés, le chantier peut faire place à un jardin ou à des constructions. Le local technique nécessaire au fonctionnement des installations est restreint. Aucun espace de stockage n'est requis et en l'absence d'approvisionnement extérieur, cela ne génère pas de trafic supplémentaire. **L'occupation foncière de la géothermie, fort réduite, lui permet, en milieu urbain dense notamment, d'être une énergie renouvelable décisive pour l'obtention des labels BBCA et HQE.**

Localisation de l'installation



Usage	Production de chaleur mutualisée pour deux équipements : l'école Pierre Jeigneux (4 598 m² depuis 2016), et la Maison de la Petite Enfance Pasteur / A Tire d'Aile (environ 1 000 m² / réception prévisionnelle en 2020).
Installation achevée en 2016, seconde phase en 2020	2 forages de 50 m (production à 13°C et réinjection à 8°C) sur aquifère, une installation technique en sous-sol.
Coûts d'investissement	Surinvestissement géothermie : 385 500 € par rapport à une solution de référence 100 % gaz. Subventions ADEME : 40 800 €, Région Île-de-France : 79 800 €.

Ecole et maison de la petite enfance à Bois-Colombes (92)

« La géothermie sur nappe à faible profondeur était la seule énergie renouvelable exploitable sur Bois-Colombes du fait de sa forte densité urbaine. La présence d'un aquifère à - 50 mètres a limité les montants financiers des forages et la technique du doublet d'équipements a permis de lisser les surcoûts d'investissement par rapport aux énergies fossiles, sur deux opérations. Ce choix reste un pari sur l'avenir et réclame une forte volonté politique et écologique, les retours d'expérience étant encore peu nombreux. Il faut s'entourer de spécialistes à la fois en géologie mais aussi en ingénierie thermique (descriptions détaillées des installations dédiées et de l'entretien du système en phase exploitation).

Yves RÉVILLON,
Maire de Bois-Colombes-Vice-Président du
Département des Hauts-de-Seine

Une énergie discrète

Une fois les travaux réalisés, la géothermie est discrète : sous terre, elle est invisible. Elle ne produit ni bruit, ni odeur. Elle est particulièrement adaptée aux bâtiments patrimoniaux, mais aussi à ceux pour lesquels l'esthétisme, le calme et le confort sont importants.



Complexe sportif de Combourg © Coquard Collet Charrier



Halle aux grains de Bois-Colombes © S2e2, Région Centre-Val-de-Loire



La Grande Passerelle, Saint-Malo © Architecture-Studio



Théâtre des Célestins, Lyon - Grande salle © Ronan Sin



Collège des Bernardins, Paris © Laurence de Terline



RAISON 6

Le choix de technologies qui ont fait leurs preuves

Des technologies éprouvées et pérennes

Plus de 210 000 pompes à chaleur géothermiques fonctionnent en France. C'est donc une technologie éprouvée. De plus, elle est en amélioration constante grâce à la capitalisation sur les bonnes pratiques, aux progrès technologiques et à la recherche.

Ce sont des technologies pérennes : la durée de vie des installations sous-sol est de l'ordre de 50 ans (soit la durée de vie du bâtiment) et celle des pompes à chaleur de l'ordre de 17 ans. Leur entretien est limité et simple (à l'exception des forages sur aquifère qui nécessitent un suivi plus régulier).

Des professionnels qualifiés

La mention RGE (Reconnu Garant de l'Environnement) permet d'identifier un réseau de professionnels qualifiés (foreurs et installateurs de pompe à chaleur, entreprises de maintenance) pour les travaux mais aussi les études (sous-sol et surface).

Les qualifications RGE

Type de prestation	Signe de qualité RGE
Études / Conseil	
Installation / Pose de la pompe à chaleur	
Installation / Pose des échangeurs souterrains (sondes, forages sur nappe)	

Financement et garantie : un accompagnement institutionnel

Un accompagnement financier incitatif à considérer : le Fonds Chaleur



<https://agirpourlatransition.ademe.fr/collectivites/financer-vos-projets>

Il cofinance les investissements nécessaires aux projets de production de chaleur et/ou de froid à partir d'énergies renouvelables et de récupération (EnR&R) ainsi que les réseaux de chaleur liés à ces installations. Ces aides financières permettent à la chaleur renouvelable d'être compétitive par rapport à celle produite à partir d'énergies conventionnelles. En amont, ce dispositif peut également être sollicité pour accompagner les études de projet.

A noter :
En complément du Fonds Chaleur, d'autres aides peuvent être allouées à la géothermie (Conseil régional, FEDER, ...).
Se renseigner auprès des antennes régionales de l'ADEME : <https://www.ademe.fr/les-territoires-en-transition/ademe-en-region/>, des conseils en énergie partagés (CEP) ou des relais locaux <https://maps.fokusvision.com/fncrr/>.
Pour savoir si votre opération est éligible au Fonds Chaleur : <http://www.fonds-chaueur.ademe.fr>.
Pour les particuliers : <https://france-renov.gouv.fr/>



Une possibilité de garantie

Cette garantie gérée par la SAF Environnement concerne les opérations sur aquifère superficiel et couvre les risques d'échec de l'opération géothermique (débit d'exploitation insuffisant lors de la mise en œuvre du forage ou non pérenne dans le temps). Elle assure ainsi pendant 10 ans les investissements réalisés pour le captage, le transfert et la réinjection de la ressource. Elle s'adresse à des projets faisant appel à une ressource d'une profondeur inférieure à 200 mètres et utilisant une pompe à chaleur de puissance thermique supérieure à 30 kW.

La Géothermie de Surface

En France en 2020,
210 000 PAC géothermiques
ont produit 5,2 TWh
de chaleur renouvelable



Coédité par l'ADEME et le BRGM
Coordinatrice de projet : Fanny Branchu
Comité de rédaction :
ADEME : Astrid Cardona-Moestro, Norbert Bommensatt, Philippe Laplaige
BRGM : Philippe Rocher, Mikael Philippe, Charles Maragna
Avec la collaboration de :
AFPG : Xavier Moch, Virginie Schmalé-Bloch
SER : Robin Apollit, Michèle Cyma
FNCCR : Guillaume Perrin
Les rédacteurs remercient ceux qui ont témoigné pour leur accueil et les informations fournies.

Maquette et réalisation : Kalankaa - Réimpression 2023
Illustration de couverture : Espace des Mondes Polaires to Updrone
ISBN : 978-2-7159-2638-2

Merci de votre attention.

