



Schéma Directeur Energie

Assistance à maîtrise d'ouvrage pour la réalisation du schéma directeur énergie de l'Ecole Polytechnique





Introduction

1. Etat des lieux

2. Schéma Directeur des Energies

3. Solutions de financement & schémas contractuels

4. Modélisation des investissements et appréciation des éléments de financement

5. Intégration des initiatives académiques

6. Feuille de route

7. Annexes

Introduction

Objectifs des tâches 3, 4 & 5 :

- Etablir un **mix énergétique** optimal en vue d'atteindre les **objectifs de décarbonation** de l'Ecole Polytechnique, à savoir -60% d'émissions de GES à horizon 2030;
- Déterminer les **étapes et plans d'actions** pour une mise en œuvre réussie (intégration des contraintes, opportunités et risques tous aspects confondus) ;
- Evaluer la **rentabilité des projets** considérés à différentes échelles et vérifier leur possible intégration technique et économique ;
- Déterminer le **calendrier de déploiement** des investissements à deux horizons (2025 puis 2030) et définir des projections à long-terme (2040-2050) ;
- Intégrer les **schémas financiers** (ainsi que les montages) accompagnant la trajectoire d'investissements envisagée ;
- Sélectionner des **solutions digitales**, apporter les recommandations pour accompagner la mise en place des mesures de décarbonation.

01

Etat des lieux

Synthèse de la phase de diagnostic et d'audit

Etat des lieux

Systèmes de comptage énergétique

Echelle de la donnée	Vecteur	Unité	Nature de la donnée
Campus	Électricité	kWh, €	Suivi mensuel des factures et pas 10min disponible (Enedis)
Transformateur	Électricité	kWh	Index mensuels relevés manuellement
Chaudières gaz	Gaz	kWh, €, m ³	Suivi mensuel des factures
Sous-station	Réseau de chaleur et de froid	kWh	Index hebdomadaires relevés manuellement
Bâtiments	Électricité/Gaz	kWh	Aucune sauf démonstrateurs

Bâtiments

Les bâtiments du campus existants et à venir ont été identifiés et associés à des travaux passés et futurs.
Il n'y a aujourd'hui pas de donnée énergétique à l'échelle des bâtiments (sauf démonstrateur).

Électricité et gaz

Les données disponibles et collectées demeurent à une maille grossière. Ces données ne permettent pas un suivi énergétique détaillé.

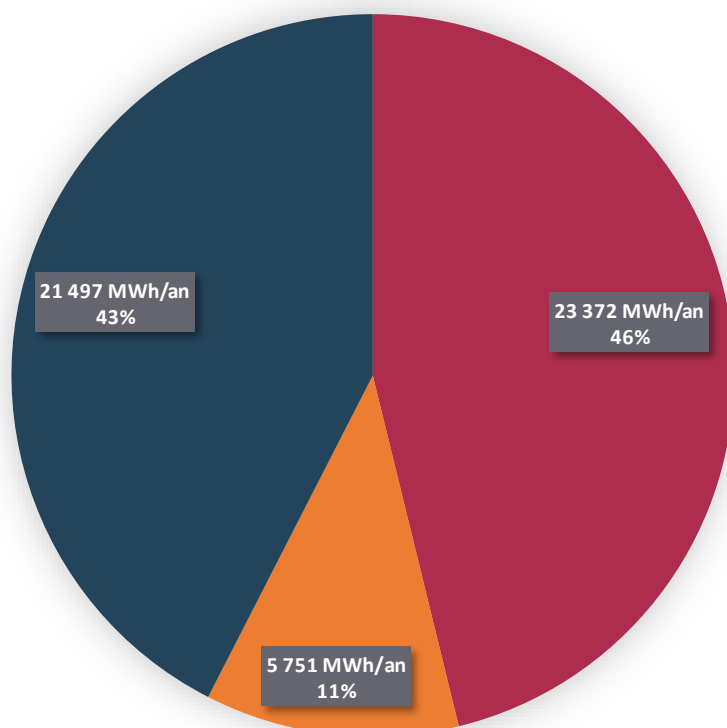
Réseau de chaleur et de froid

Les données collectées manuellement en sous-station ne sont pas utilisées aujourd'hui pour le suivi des consommations et la performance des infrastructures.

Etat des lieux

Consommation énergétique du campus

Consommations d'énergie primaire du campus Factures 2019

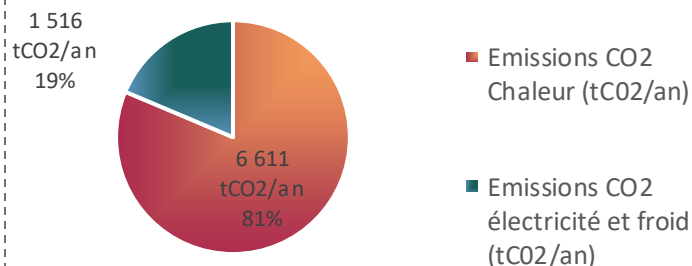


- Consommation de gaz - Chaufferie principale
- Consommation de gaz - Chaufferies individuelles
- Consommation d'électricité - TOTAL CAMPUS

Comparaison avec des campus européens (source : benchmark) :

Polytechnique	EPFL	Berlin - FUB	Unité
15	9	4	MWh/ETP
33	25	25	MWh/élève
10	6	3	MWh/usager

Emissions carbone calculées* - 2019



* Les émissions carbone prennent en compte l'ensemble des émissions liées aux consommations énergétiques (combustion + transport/extraction). Les résultats peuvent différer du bilan Carbone ® réalisé en 2019 qui décompose ces émissions sous différentes catégories d'émissions (scope 3 : Emissions liées à l'énergie non incluses dans les postes 1 à 7).

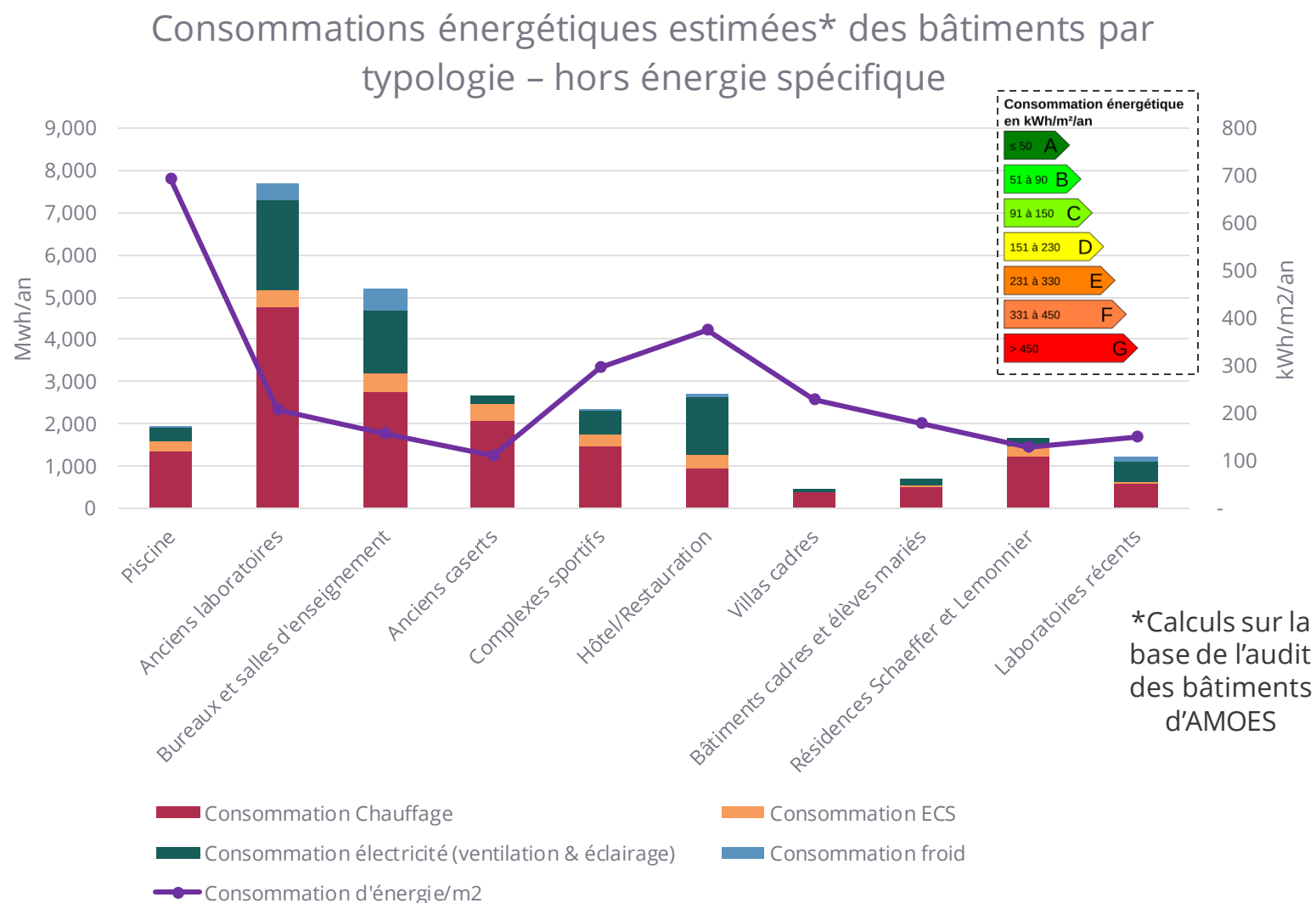
Facteurs d'émissions considérés :

Vecteur	kgCO2/kWh	Source
Gaz (PCI)	0,227	Base Carbone ADEME - France continentale 2015
Electricité	0,0607	Base Carbone ADEME - France continentale 2019

- ❑ Les **consommations de chaleur** (chauffage & ECS) concernent un peu plus de 50% des consommations énergétiques du campus et **80% des émissions de GES**. Il s'agit du **principal levier d'action** permettant de réduire les émissions carbone
- ❑ Les usages électriques représentent les 20% d'émissions restantes, pour la plupart liées aux activités de l'Ecole (équipements spécifiques, expériences laboratoires...)

Etat des lieux

Usages énergétiques à l'échelle des bâtiments



- Les phases de diagnostic et d'audit ont permis d'estimer les **consommations énergétiques des bâtiments** du campus pour les usages définis par la réglementation thermique, i.e. hors équipements spécifiques et process liés à l'activité de l'Ecole (lasers, matériel informatique...)
- Ces consommations permettent d'estimer **la performance** (kWh/m²) des bâtiments, regroupés par grand ensemble et de hiérarchiser les **actions** à mener

Energie liée au process

Future campagne de mesure

Vers une meilleure compréhension de l'énergie spécifique aux activités de l'Ecole

Afin d'aller plus loin dans la prise en compte et la compréhension de la part effective liée à ses activités spécifiques, l'Ecole Polytechnique pourra mener une **campagne de mesures énergétiques ciblées sur ses équipements & process**.

Ces équipements représentent une part significative des consommations électriques, estimées aujourd'hui à plus de 50% de la facture globale. Il s'agit, pour la plupart, de process énergivores tels que :

- Les équipements scientifiques pour la recherche : lasers, accélérateurs, supercalculateurs, ...
- Le matériel informatique : (serveurs, écrans, ordinateurs, ...)

Cette campagne de mesure devra être effectuée sur une **période représentative** de l'utilisation de ces équipements et de l'occupation de l'école, par exemple en période hivernale.

Les résultats de la campagne permettront de comprendre plus finement la répartition de l'usage de l'énergie sur le campus et la part associée aux process. Cela permettra aussi d'identifier les actions d'efficacité énergétique à mettre en place pour ces activités.



Exemples de matériels de mesure

Etat des lieux

Hypothèses de travail pour la constitution du SDE

Consommations des bâtiments

- La phase d'audit des bâtiments menée par AMOES a permis de compléter la phase de diagnostic et de calculer des ratios de consommation énergétique par typologie de bâtiment pour les usages définis par la RT
- Les consommations énergétique de l'ensemble des bâtiments du campus ont été ainsi estimées à partir de ces ratios

Puissances appelées sur le réseau de chaleur

- La demande au pas horaire a été estimé à partir des consommations de gaz de la chaufferie principale et des DJU de l'année 2019
- Une note de calcul en annexe détaille la méthodologie utilisée pour construire ces valeurs

Puissances appelées sur le réseau de froid

- La demande au pas horaire a été estimé à partir des consommations électrique du transformateur associé à la production de froid et de la température extérieure de l'année 2019
- Une note de calcul en annexe détaille la méthodologie utilisée pour construire ces valeurs

Schéma directeur des énergies

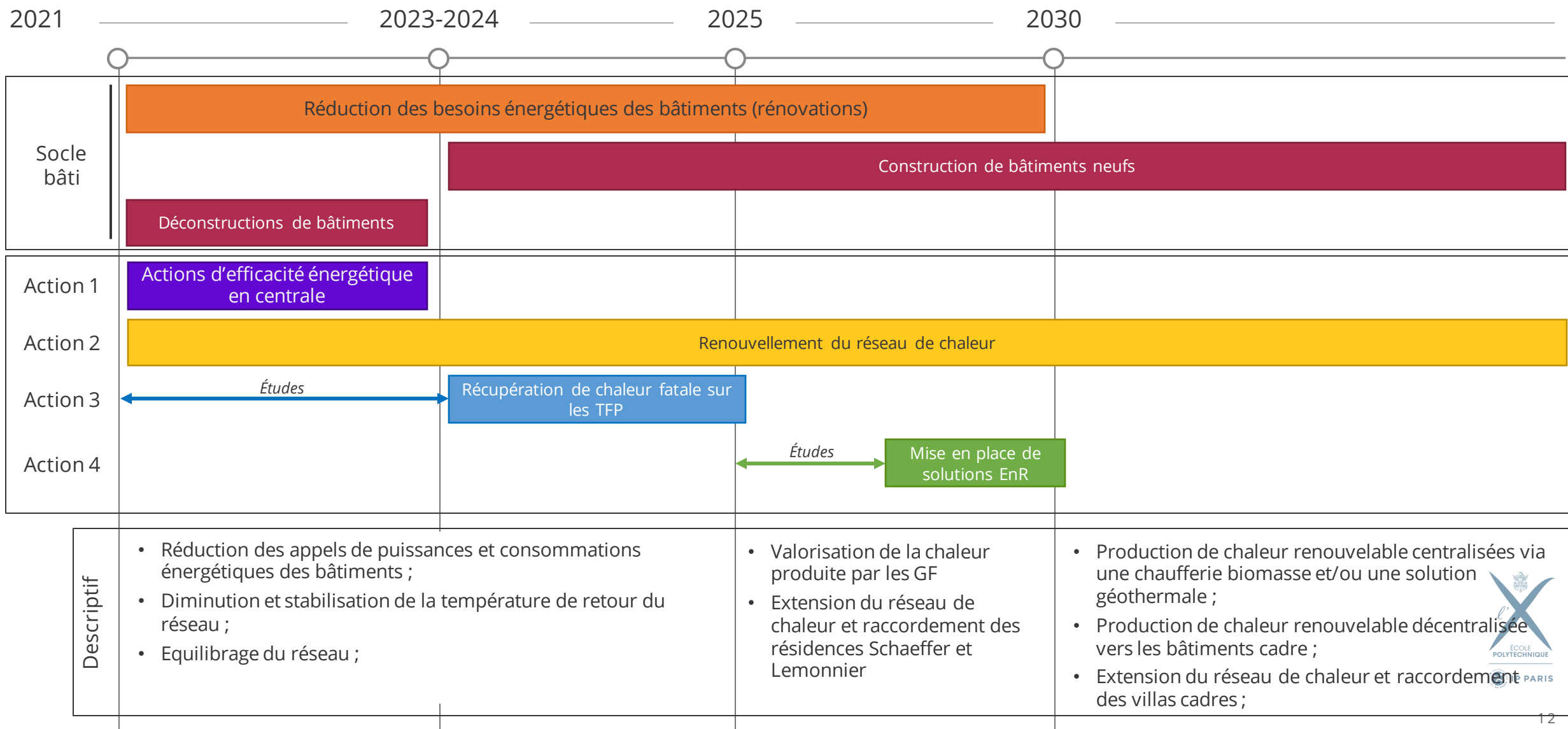
Conception du SDE et scénarios énergétiques

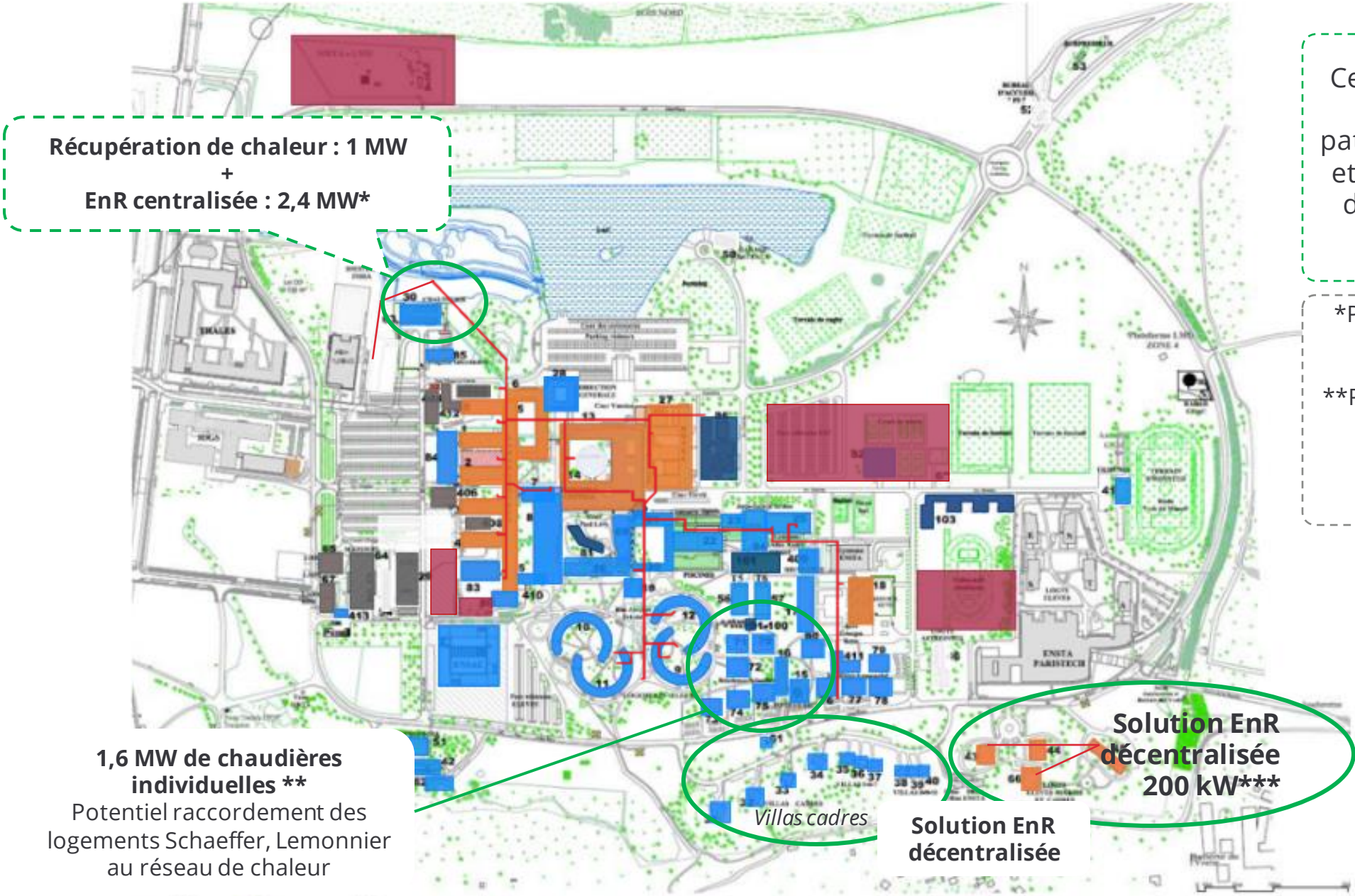
Déroulement du schéma directeur

- La stratégie définie dans le schéma directeur est composée :
 - D'un état initial, nommé « **socle** », comprenant l'ensemble des projets immobiliers engagés (construction et démolition de bâtiments, rénovation des enveloppes et des systèmes énergétiques dans les bâtiments) ;
 - De 4 **actions** principales, déclinées en sous-actions dans certains cas de figures, visant à atteindre les objectifs de l'Ecole Polytechnique ;
- Cette stratégie est présentée dans la suite de ce document suivant 4 étapes, chacune cumulant les impacts (investissements, réduction des consommations, ...) de chaque action dont la synthèse est schématisée ci-dessous :



Phasage des actions





Cette cartographie du campus présente l'évolution du patrimoine immobilier de l'Ecole et de son réseau de chaleur et de froid afin d'atteindre **80% d'EnR&R** à horizon 2030

- *Puissance calculée pour atteindre 80% d'EnR&R (source : Tilia)
- **Puissances installées actuellement (source : Polytechnique)
- ***Puissance estimée après rénovation des bâtiments

- Bâtiments existants
- Bâtiments récents
- Bâtiments dont la déconstruction est prévue
- Futurs bâtiments
- Bâtiments dont la rénovation est prévue
- Réseau de chaleur

Socle

- Rénovations engagées
- Développement net du patrimoine

Projets immobiliers engagés : le socle du SDE

Rénovations engagées & développement net du patrimoine

Programmation immobilière

Hypothèses de travail

Prise en compte de la programmation immobilière

Le schéma directeur s'appuie sur la programmation immobilière prévue en 2021 pour le campus de l'Ecole :

- Liste des **futurs bâtiments** et de leur date de livraison
- Liste des **bâtiments déconstruits** et date de déconstruction prévue
- Liste des bâtiments à rénover et date de rénovation

Futurs bâtiments	Date de livraison	Commentaire
Bat 102-BEM	2021	
Bat 104-Pôle Meca	2023	
bat 106-LLR	2021	
Developpement potentiel :		
Phase 1 :	2030	50 000 m2 en 3 phases de développement
Phase 2 :	2035	
Phase 3 :	2040	
Futurs bureaux/enseignement	2026	5000 m ²
SIRTA	2021	

Bâtiments rénovés	Date de rénovation
Laboratoires anciens (peigne)	2024
bat 13-Ensemble central	2026
bat 14-AMPHI Arago/Poincaré/Bibliothèque	2026
bat 18-Service auto	2026
bat 27-Hôtel / restauration	2026
Bâtiments cadres et élèves mariés	2026

Bâtiments déconstruits	Date déconstruction
bat 29-DPI - LLR	2024
bat 404-annexe	2026
bat 404-X-TEC	2026
bat 406-P I C M	2026
bat 408-P I C M	2026
bat 412-L I X	2026
bat 64-Matériel	2024
bat 65-LMS-LADHYX	2024
bat 67-LADHYX-DED	2024

Socle: Rénovations engagées, développement net du patrimoine

Hypothèses de travail

Socle bâtementaire

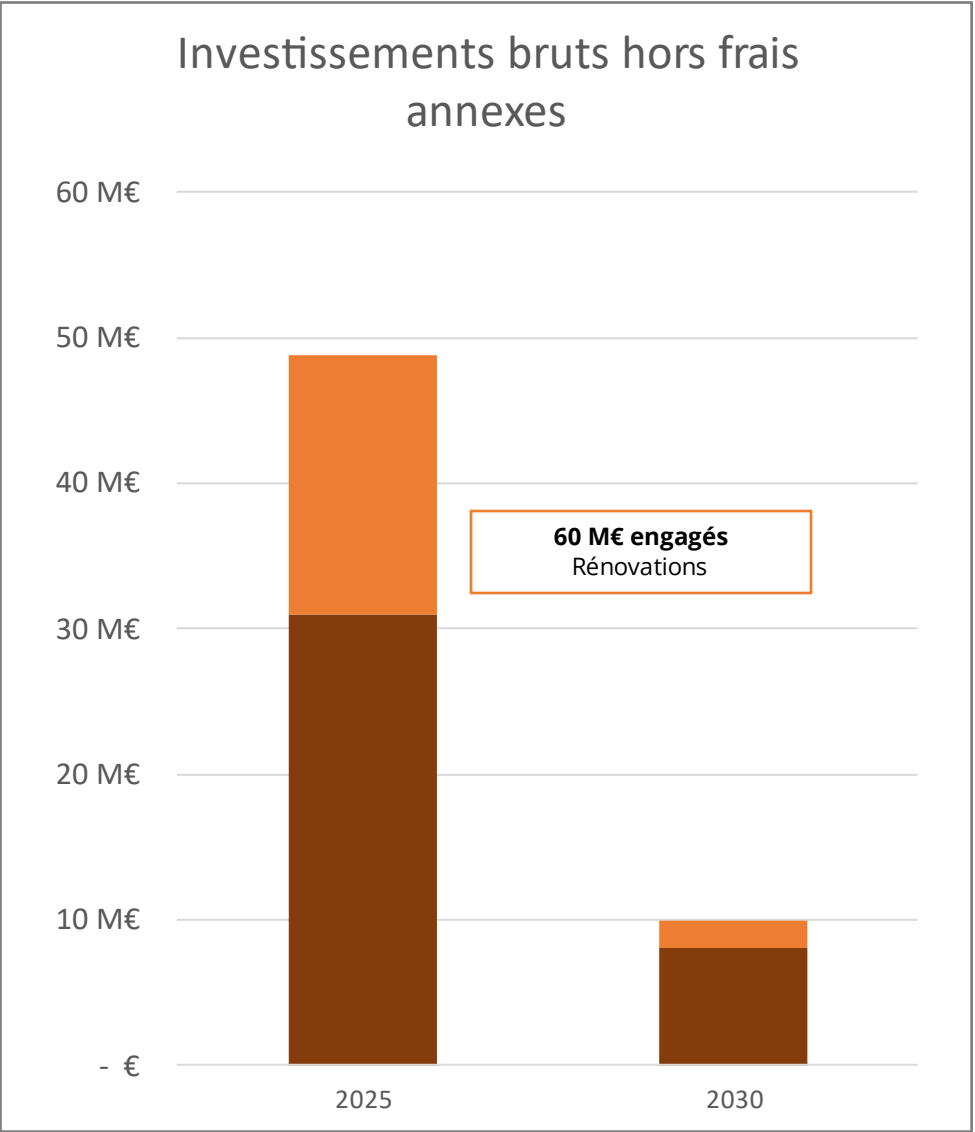
- Prise en compte des **opérations planifiées sur les bâtiments existants** et de leur phasage. Transcription en APE pour les économies d'énergie (chaleur & électricité), impact carbone et investissements dans l'outil AMOES.
- Les APE définies par AMOES pour des ensembles de bâtiments ont été reprises et déclinées uniquement pour les bâtiments concernés.
- **Rénovation de la piscine** (bat 22) après 2026.
- Prise en compte des **futurs bâtiments** dans la consommation globale du campus. Les ratios de consommations sont issus des valeurs cibles définies par AMOES suite à l'audit des bâtiments. Ces ratios respectent le seuil E3 du label E+C- prescrit dans la stratégie DD du secteur QEP Est.
- Prise en compte des **bâtiments déconstruits**.

Investissements

- Enveloppes bâtiments : investissements issus de l'outil APE – AMOES
- Systèmes bâtiments : investissements issus de l'outil APE – AMOES

Année de référence : 2019

- Consommation de gaz PCI 2019 : factures 2019
- Consommation d'électricité 2019 : factures 2019



A horizon 2050

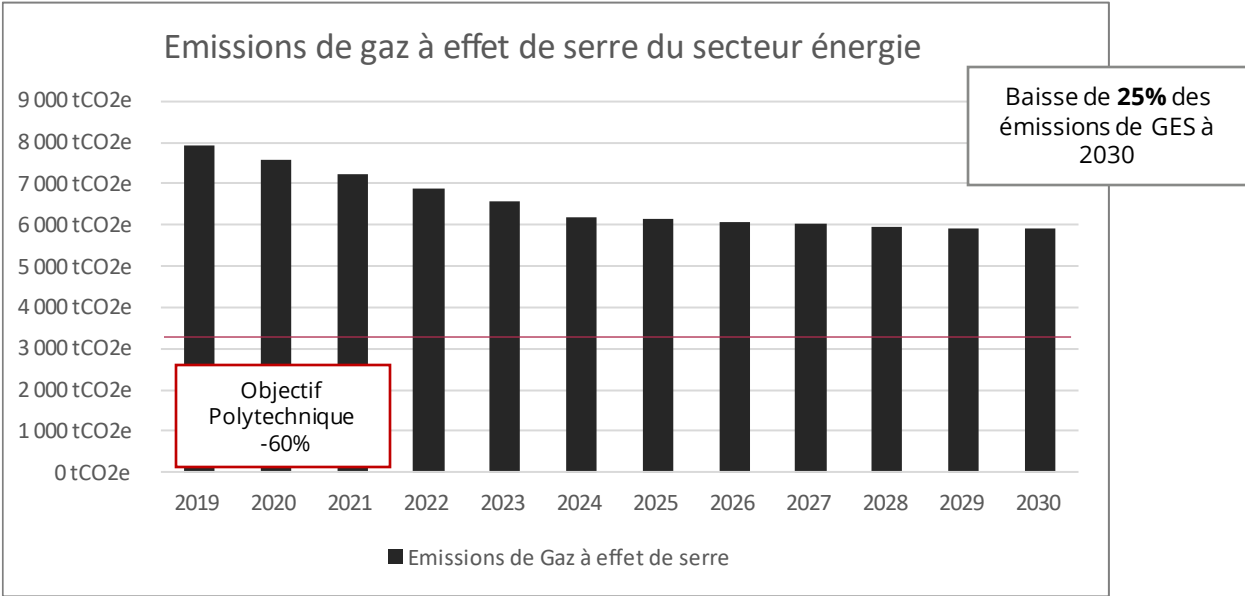
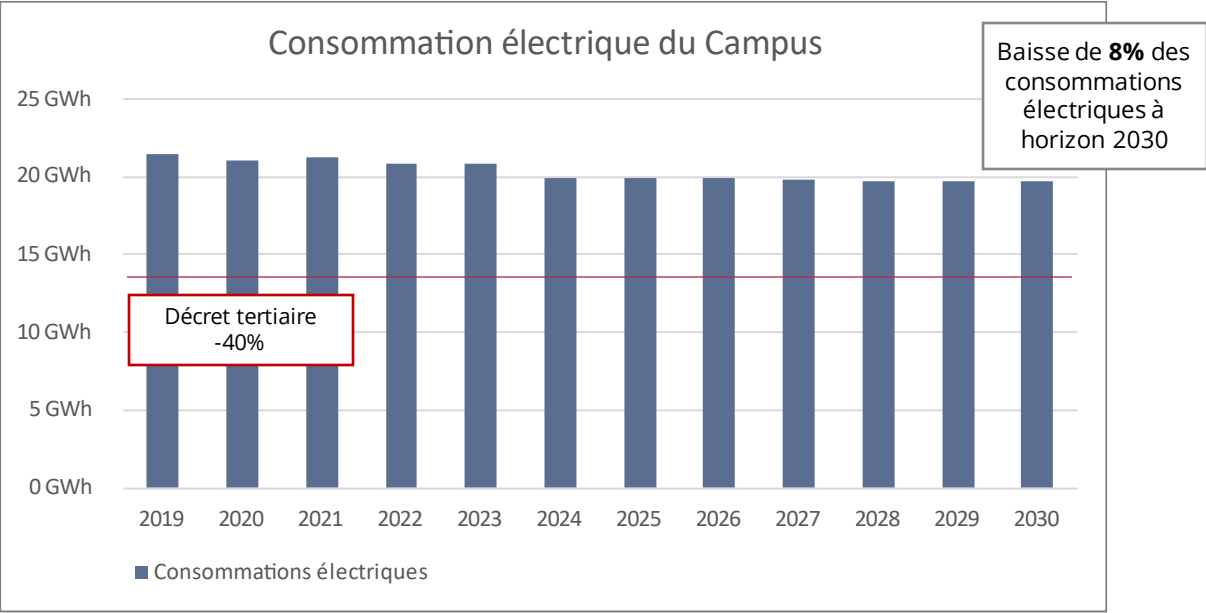
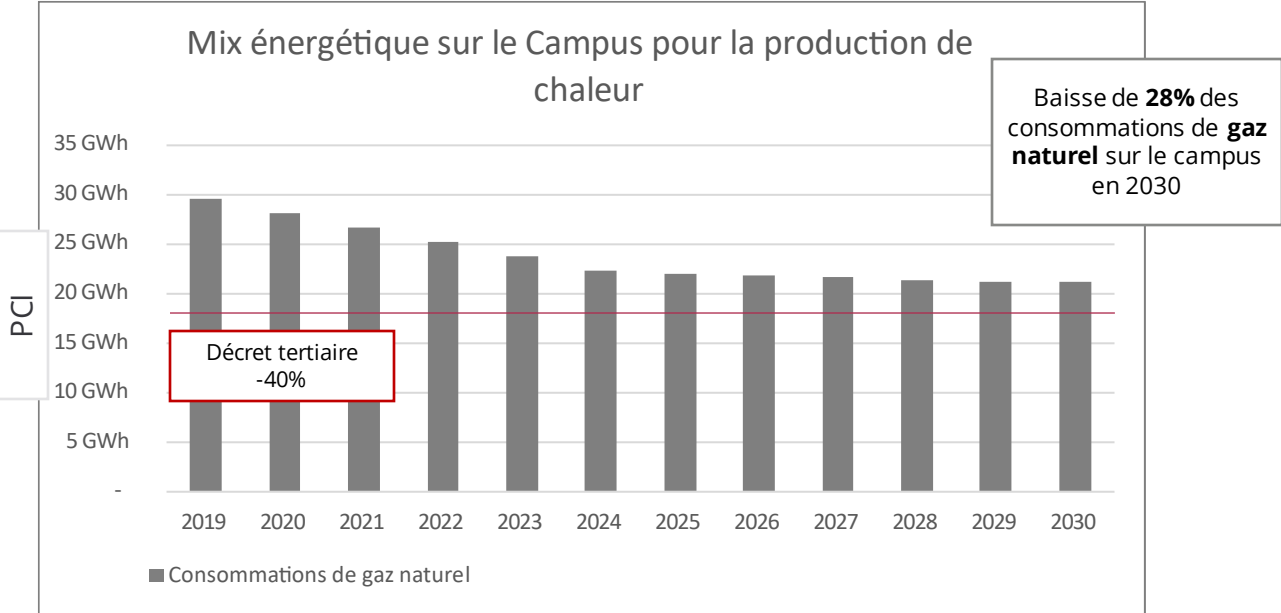
Actions	Investissements	Gaz (GWh PCI)	Electricité	Emission de GES
Développement net du patrimoine	-	-0,4 GWh (-1,4%)	0,6 GWh (3,0%)	-57 tCO2e (-0,7%)
Rénovation des enveloppes	40 M€	-6,6 GWh (-22,5%)	0,0 GWh (0,0%)	-1 506 tCO2e (-19,0%)
Rénovation des équipements	20 M€	-1,8 GWh (-6,0%)	-2,4 GWh (-11,1%)	-538 tCO2e (-6,8%)

Actions d'efficacité énergétique

- Rénovation des enveloppes des bâtiments
- Rénovation des équipements des bâtiments
- Renouvellement du réseau de chaleur
- Optimisation des outils de production centralisés d'énergie

Productions d'énergie

- Récupération de chaleur fatale sur les groupes froid
- Production d'énergie renouvelable
- Achat d'énergie décarbonée (biométhane et/ou électricité décarbonée)



Impacts

- Rénovations engagées : bâtiment restauration, cadres et élèves mariés.
- Rénovations programmées : anciens laboratoires, bâtiment 14 (amphithéâtres) et bâtiment central;
- Le développement net du patrimoine (construction de 80 000 m² et démolition de 10 000 m²) est inclus dans le scénario « socle ». Son impact sur les évolutions des consommations énergétiques du campus est limité (<5%) ;
- La rénovation énergétique des bâtiments et le renouvellement des équipements permet de réduire de **28% les consommations de gaz et de 25% les émissions de GES à horizon 2030 ;**

Socle

- Rénovations engagées
- Développement net du patrimoine

Action 1

- Mesures d'efficacité énergétique en centrale

Etape 1 : Mesures d'efficacité énergétique en centrale

Etape 1 : Mesures d'efficacité énergétique en centrale

Hypothèses de travail

Puissances appelées sur le réseau de chaleur

- La demande au pas horaire a été estimée à partir des consommations de gaz de la chaufferie principale et des DJU de l'année 2019.
- Les gains énergétiques liés aux actions de performance énergétique sur les enveloppes et les systèmes des bâtiments ont été comptabilisés et contribuent à réduire l'appel de puissance des bâtiments sur le réseau de chaleur de l'Ecole.

Actions de réductions des consommations énergétiques

- Ces mesures concernent principalement la chaufferie principale, la centrale froid et le réseau de chaleur et de froid
- Les gains énergétiques liés à ces actions se superposent aux gains réalisés dans le cadre des projets immobiliers engagés par l'Ecole (socle).
- Ces actions sont détaillées dans le tableau ci-après.

Etape 1 : Mesures d'efficacité énergétique en centrale

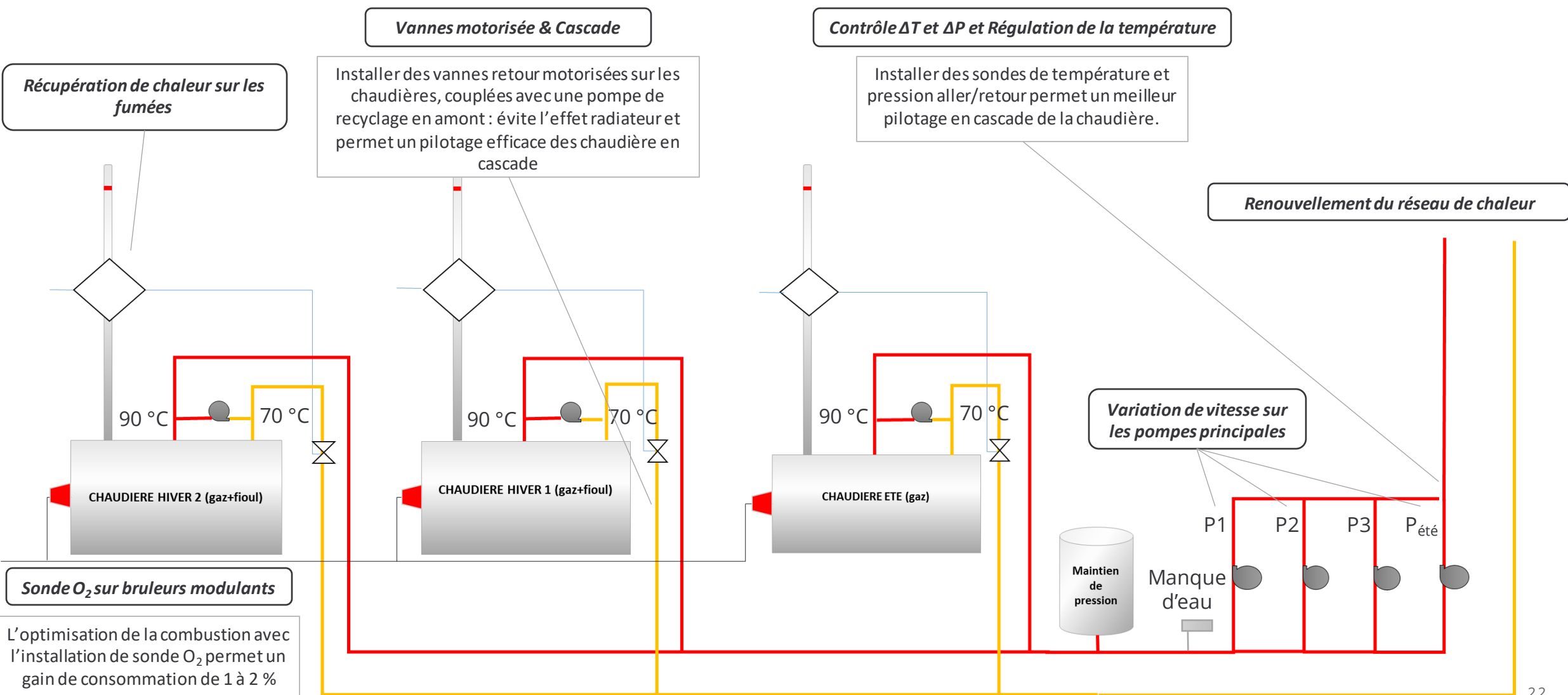
Actions identifiées en centrale

Ouvrage	Equipement	Type d'action	Description de l'action	Commentaire
Chaufferie centrale	Chaudières	Récupération de chaleur fatale	Récupération de chaleur sensible sur les fumées des chaudières	Vérifier la conformité des travaux
Chaufferie centrale	Chaudières	Régulation	Mise en place/remplacement sondes O2	Vérification bruleur bas NOx avec sonde O2 fonctionnel
Chaufferie centrale	Chaudières	Régulation	Cascade - Vanne motorisées sur retour chaudière	Vérification de l'existence d'un automate, de son fonctionnement et de la nécessité de le reprogrammer
Chaufferie centrale	Pompes réseau primaire	Régulation	Instrumentation pompe départ avec mise en place de manomètres et régulation des pompes sur leur plages de fonctionnement (ex: 2 bars pour pompes KSB) Mise en place de vannes d'équilibrage TA	Vérification de l'existant (manomètres chaufferie et vannes d'équilibrage en SST)
Chaufferie centrale	Chaudières	Régulation	Température départ chaudières fixe - Mise en place sondes de températures sur départ réseau	Essais sur température départ chaudière (réduction de la température départ)
Chaufferie centrale	Pompes réseau primaire	Régulation	Mise en place de variateurs de vitesse sur les pompes principales	Vérifier le fonctionnement actuel des pompes et l'optimiser en lien avec les courbes de pompes et l'installation de variateurs de vitesse
Centrale froid	TAR	Régulation	Mise en place d'une sonde de température ou d'un thermostat sur les ventilateurs des TAR. Régulation du fonctionnement des ventilateurs des TAR en cascade	Vérification de l'existant (sondes température et automate)
Centrale froid	Groupes froid	Régulation	Optimiser les points de fonctionnement de la centrale froid, vérifier et optimiser le fonctionnement de la cascade- Essais et tests sur les réglages des Groupes froid	
Réseaux chaud	Réseaux	Rénovation	Renouvellement de x ml de réseaux / 100% du réseau	Renouveler 100% du réseau permet de réduire de 9% les pertes thermiques

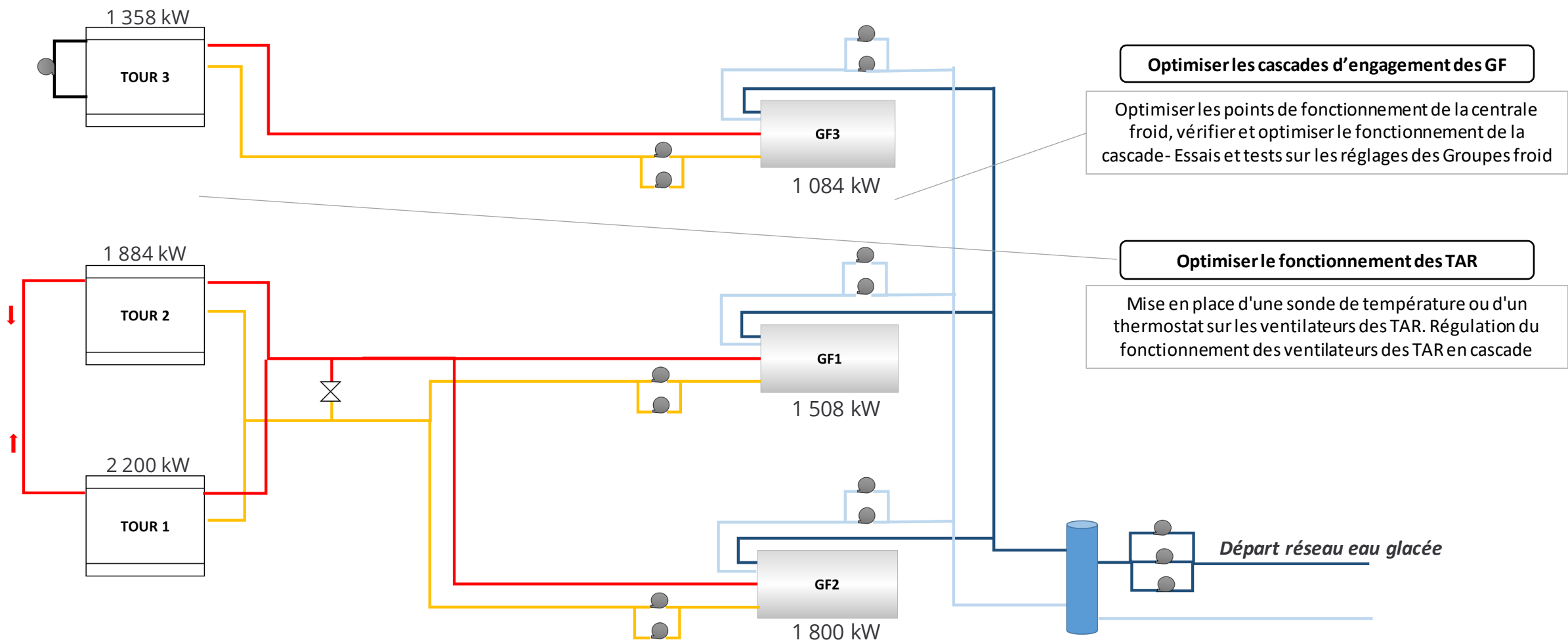
Etape 1 : Mesures d'efficacité énergétique en centrale



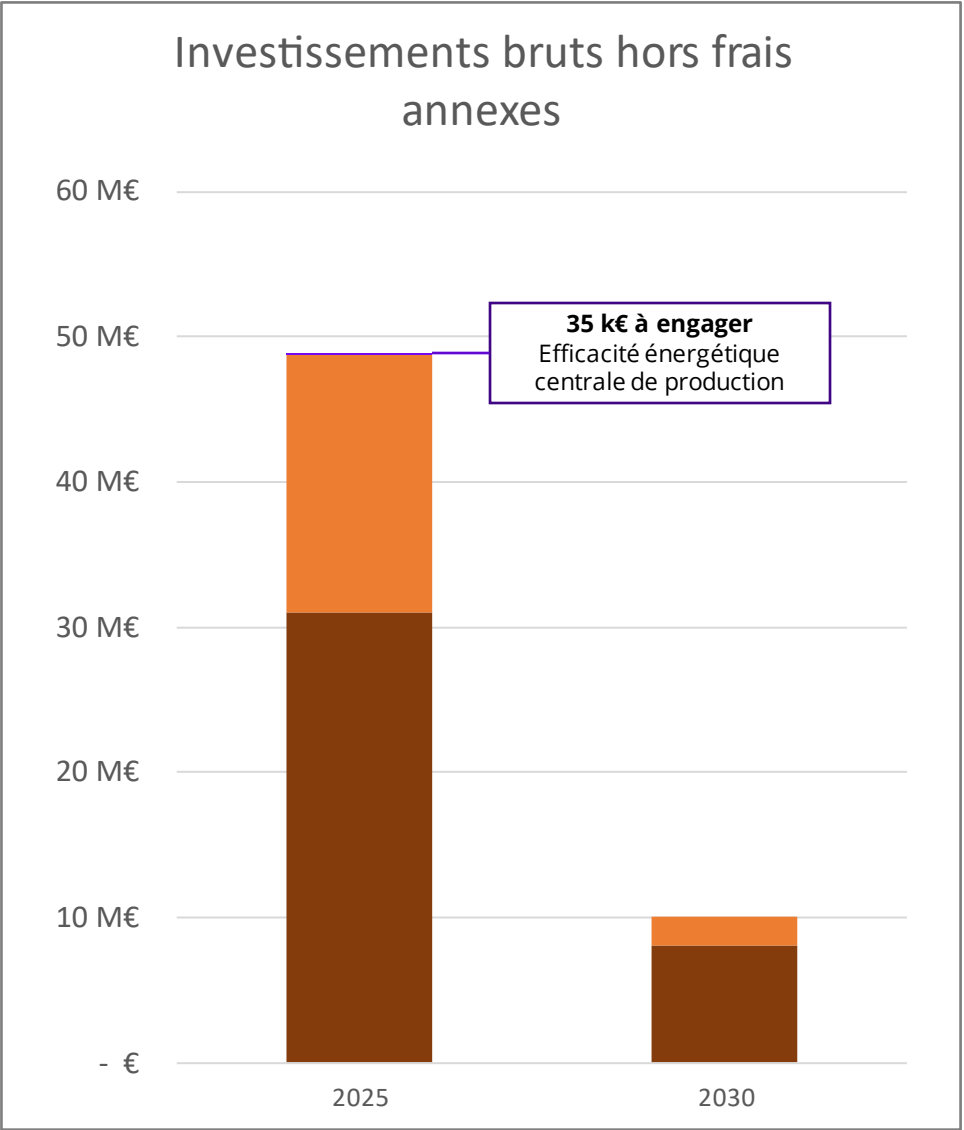
Actions d'efficacité énergétique : chaufferie gaz



Actions d'efficacité énergétique : centrale de production de froid



A horizon 2050				
Actions	Investissements	Gaz (GWh PCI)	Electricité	Emission de GES
Développement net du patrimoine	-	-0,4 GWh (-1,4%)	0,6 GWh (3,0%)	-57 tCO2e (-0,7%)
Rénovation des enveloppes	40 M€	-6,6 GWh (-22,5%)	0,0 GWh (0,0%)	-1 506 tCO2e (-19,0%)
Rénovation des équipements	20 M€	-1,8 GWh (-6,0%)	-2,4 GWh (-11,1%)	-538 tCO2e (-6,8%)
Actions efficacité énergétique centrale	35 k€	0,0 GWh (0,0%)	-0,1 GWh (-0,3%)	-464 tCO2e (-5,9%)

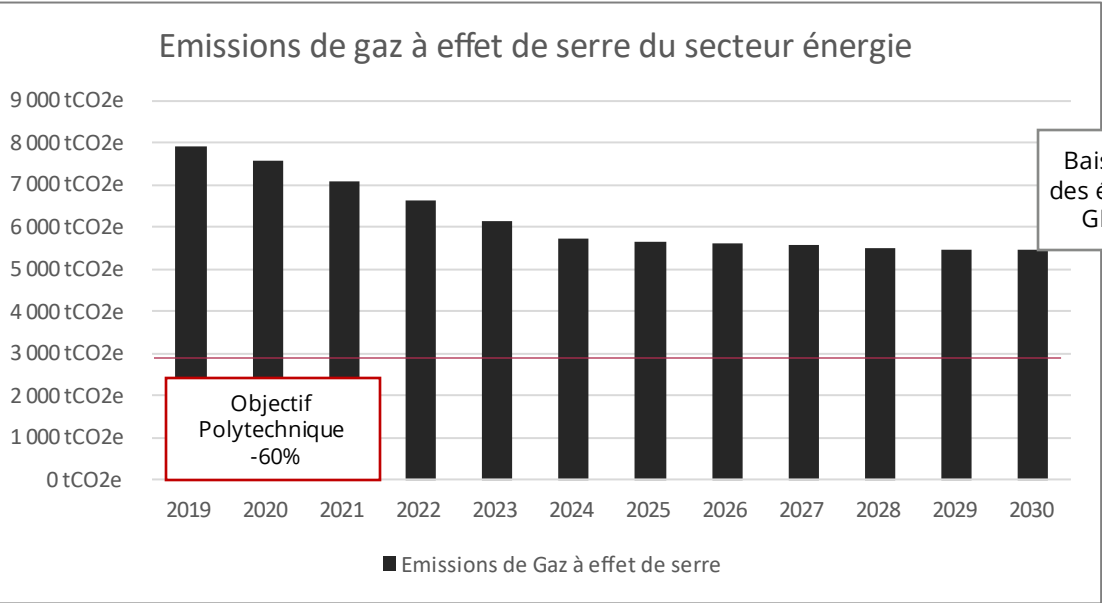
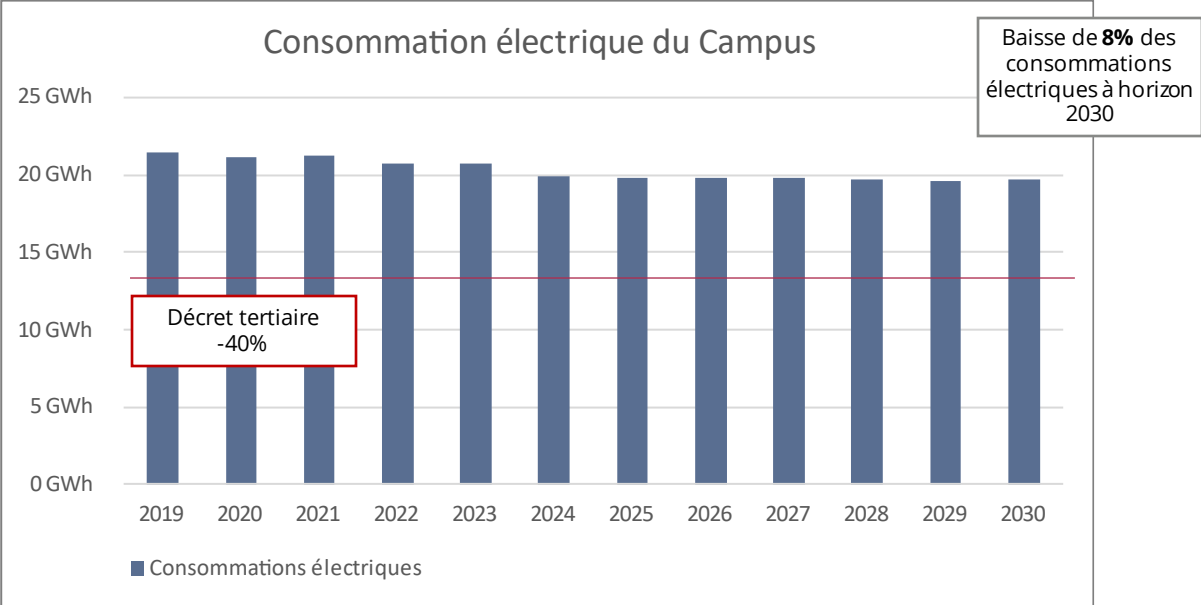
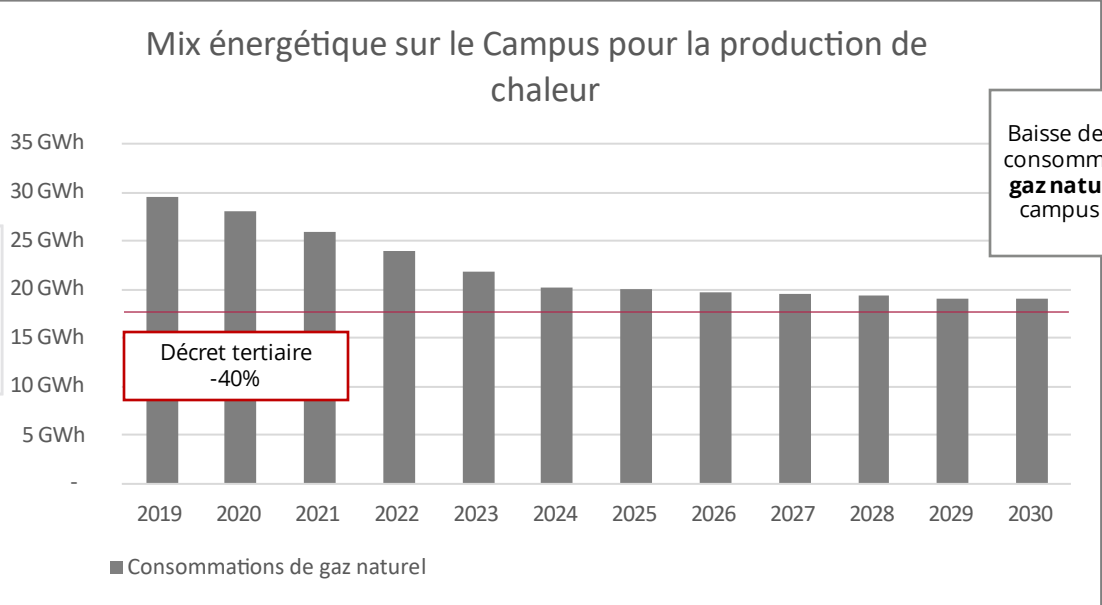


Actions d'efficacité énergétique

- Rénovation des enveloppes des bâtiments
- Rénovation des équipements des bâtiments
- Renouvellement du réseau de chaleur
- Optimisation des outils de production centralisés d'énergie

Productions d'énergie

- Récupération de chaleur fatale sur les groupes froid
- Production d'énergie renouvelable
- Achat d'énergie décarbonée (biométhane et/ou électricité décarbonée)



Impacts

- Mesures d'efficacité énergétique en chaufferie;
- Mesures d'efficacité énergétique de la centrale de production de froid;
- Optimisation du fonctionnement global de la centrale permettant de faciliter l'intégration future d'énergie renouvelable ;
- La contribution de cette action aux précédentes permet de réduire de **35% les consommations de gaz et de 31 % des émissions de GES à horizon 2030 ;**



Etape 2 : Renouvellement du réseau

Action 2 : Renouvellement du réseau de chaleur

Hypothèses de travail

Méthode de calcul des pertes réseau

Etat du réseau :

- Le réseau primaire est principalement composé de tubes en acier. Certaines parties, non identifiées, ont fait l'objet de renouvellement par des tubes en acier pré-isolé.
- L'isolation est en très mauvais état par endroit voir absente.

Calcul des pertes :

Nous avons calculé des niveaux de pertes théoriques en fonction des mètres linéaires, du diamètre et des informations disponibles de l'état du réseau. Nous avons ainsi :

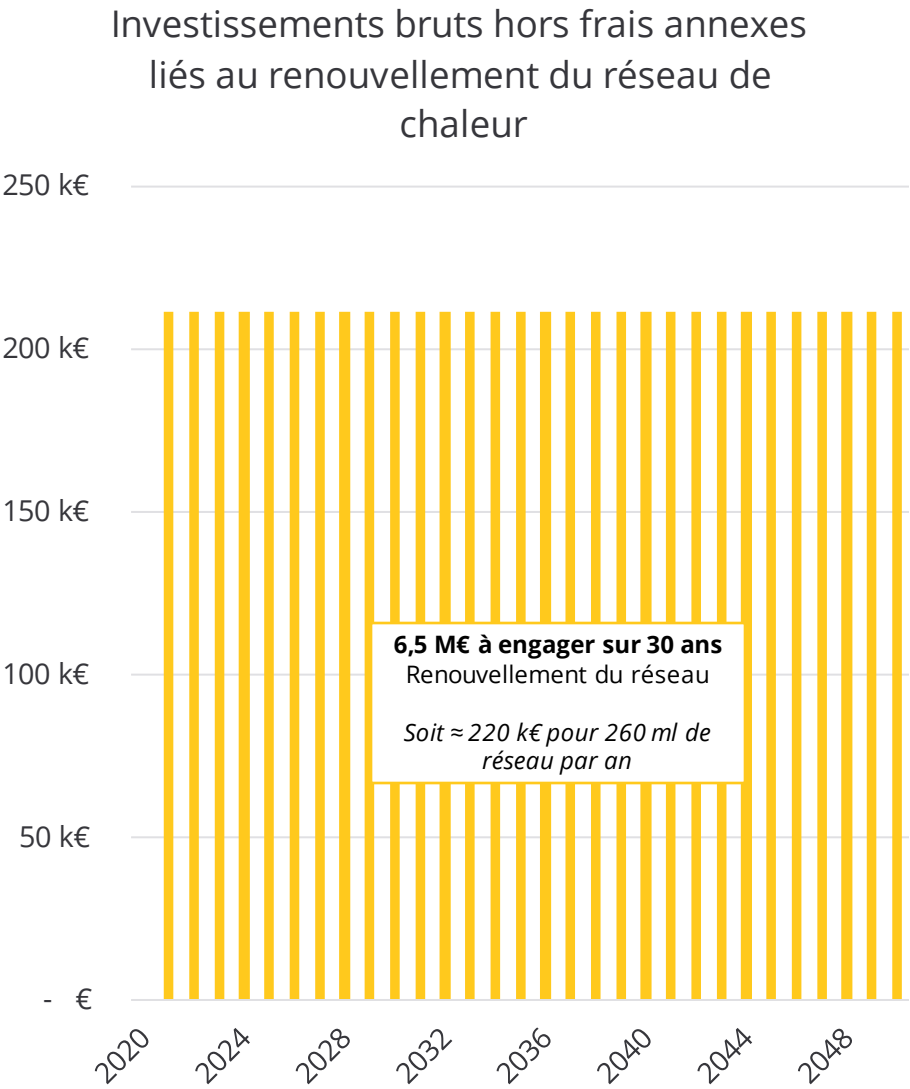
- Calculé les **résistances linéiques des canalisations** en fonction de leur diamètre
- Fixé une **température moyenne de 85 °C** circulant dans le réseau
- Catégorisé les mètres linéaires de réseau par type de diamètre
- Estimé une dégradation de l'ordre de **60%** de l'isolant **sur 90% du réseau**
- Calculé les pertes pour chaque catégorie de diamètre du réseau dégradé

Résultats :

- Les pertes thermique du réseau chaud sont évaluées à **23 %**,
- Les pertes froid sont évaluées à **2,5%**. Nous estimons qu'elles pourraient atteindre **1,2%** avec un renouvellement complet du calorifugeage.

Hypothèse de renouvellement :

- D'après nos calculs, renouveler l'intégralité du réseau chaud dégradé d'ici 2050 revient à renouveler environ **260 ml/an** de réseau chaud;
- Cela reviendrait à réduire les pertes thermiques du réseau chaud de **13%** et donc d'atteindre **10% de pertes**;
- De plus, en abaissant la température globale du réseau chaud de 20°C, nous estimons que les pertes pourraient être réduites à **8%**;



A horizon 2050

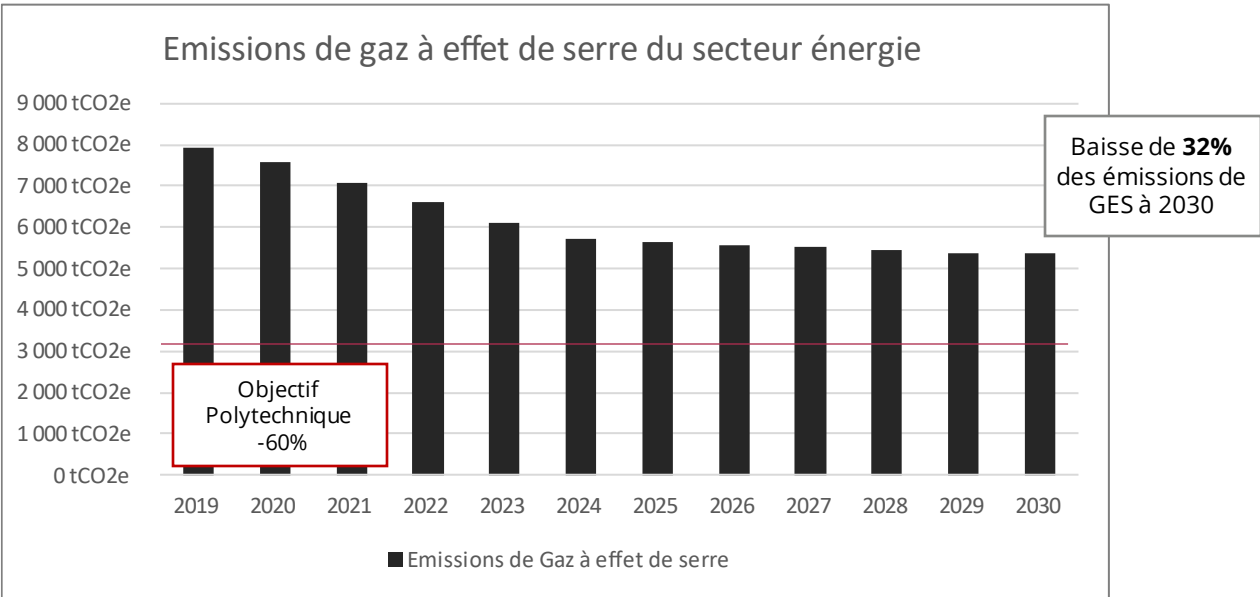
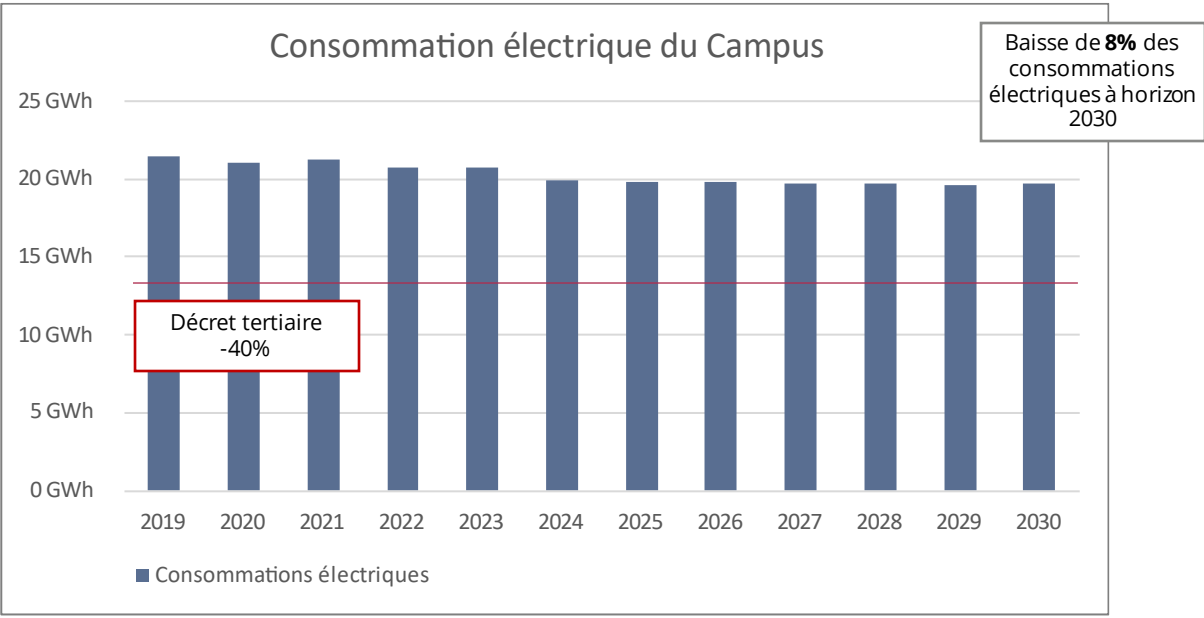
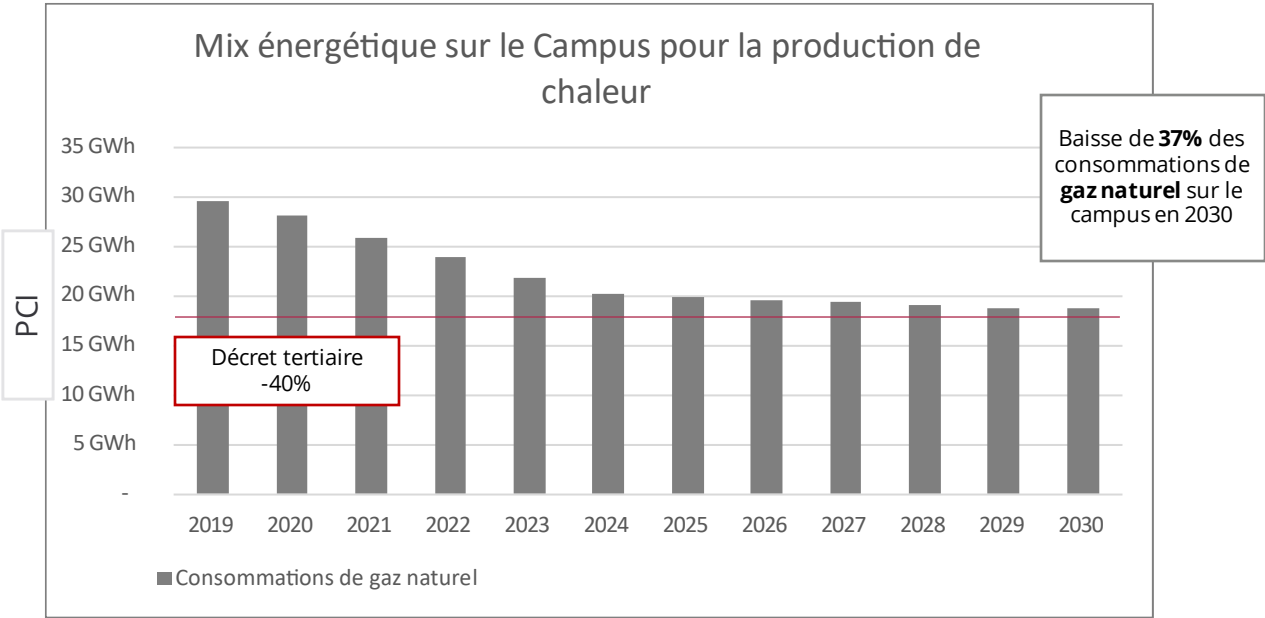
Actions	Investissements	Gaz (GWh PCI)	Electricité	Emission de GES
Développement net du patrimoine	-	-0,4 GWh (-1,4%)	0,6 GWh (3,0%)	-57 tCO2e (-0,7%)
Rénovation des enveloppes	40 M€	-6,6 GWh (-22,5%)	0,0 GWh (0,0%)	-1 506 tCO2e (-19,0%)
Rénovation des équipements	20 M€	-1,8 GWh (-6,0%)	-2,4 GWh (-11,1%)	-538 tCO2e (-6,8%)
Actions efficacité énergétique centrale	35 k€	-0,5 GWh (-1,6%)	-0,1 GWh (-0,3%)	-435 tCO2e (-5,5%)
Renouvellement du réseau de chaleur	6,5 M€	-1,9 GWh (-6,4%)	0,0 GWh (0,0%)	-109 tCO2e (-1,4%)

Actions d'efficacité énergétique

- Rénovation des enveloppes des bâtiments
- Rénovation des équipements des bâtiments
- Renouvellement du réseau de chaleur
- Optimisation des outils de production centralisés d'énergie

Productions d'énergie

- Récupération de chaleur fatale sur les groupes froid
- Production d'énergie renouvelable
- Achat d'énergie décarbonée (biométhane et/ou électricité décarbonée)



Impacts

- Le réseau de chaleur de l'école Polytechnique est composé d'environ 9 km de tranchées. La mise en place d'un plan de renouvellement phasé dans le temps permettrait d'augmenter les performances des installations sur le long termes ;
- Les travaux de renouvellement du réseau sont une opportunité pour le raccordement d'autres bâtiments sur le réseau de chaleur de l'école Polytechnique;
- Le cumul des actions permet de réduire de **37% les consommations de gaz et de 32 % des émissions de GES à horizon 2030 ;**



Etape 3 : Récupération d'énergie fatale

Etape 3 : Récupération d'énergie fatale

Valorisation des ressources locales

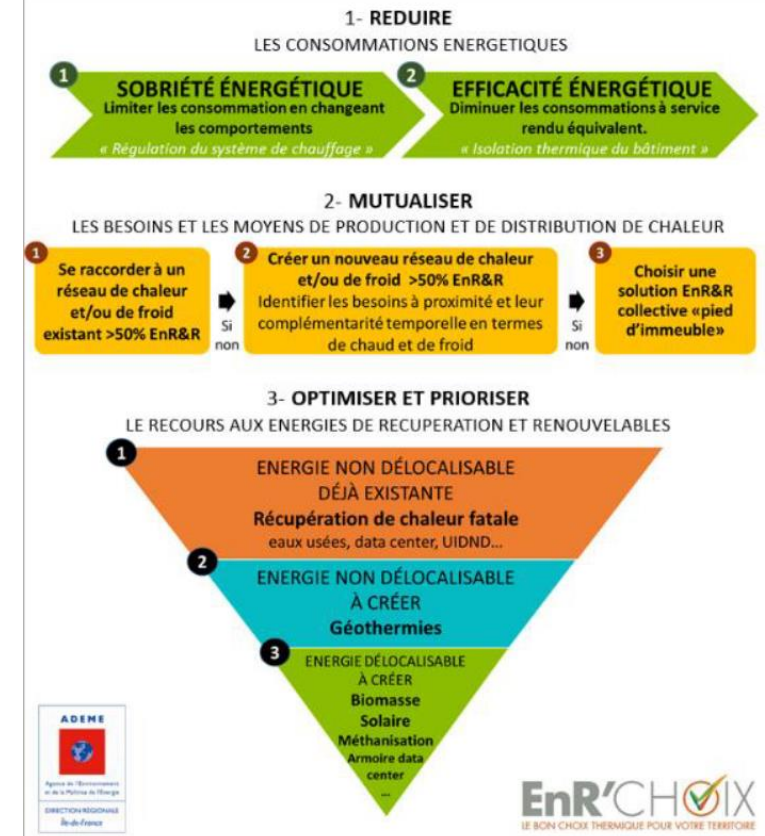
Priorisation des sources d'EnR&R:

- La méthode EnR'CHOIX mise en place par l'ADEME préconise de valoriser en priorité les énergies non délocalisables et déjà existantes.
- Les visites du site de l'école polytechnique ainsi que les données de facturation nous ont conduit à considérer une solution de récupération et de valorisation de l'énergie thermique dégagée par les groupes froid présents en centrale de production.

Méthode d'évaluation du potentiel disponible :

L'évaluation de la capacité de valorisation de la chaleur fatale des groupes froid s'appuie sur :

- La courbes des besoins en frigories des installations de l'école recalculée grâce aux factures de consommations électriques de la centrale de l'école Polytechnique.
- Des consommations de chaleur du site évaluées en prenant en compte les mesures de rénovation thermiques ainsi que les nouveaux bâtiments prévus sur site.
- La baisse de la température de départ du réseau induit par la combinaison des mesures d'efficacité énergétique en centrale et des actions de rénovation des bâtiments.



Etape 3 : Récupération d'énergie fatale

Hypothèses de travail

Puissances appelées sur le réseau de chaleur

- La demande au pas horaire a été estimé à partir des consommations de gaz de la chaufferie principale et des DJU de l'année 2019.
- Les gains énergétiques liés aux actions de performance énergétique sur les enveloppes et les systèmes des bâtiments ont été comptabilisés et contribuent à réduire l'appel de puissance des bâtiments sur le réseau de chaleur de l'Ecole.

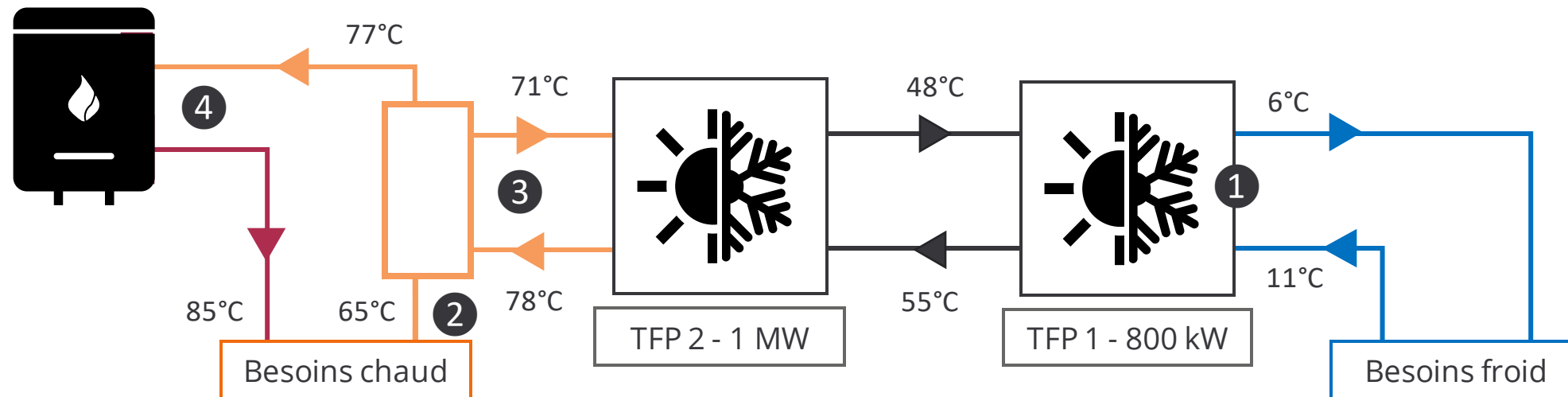
Solutions EnR&R

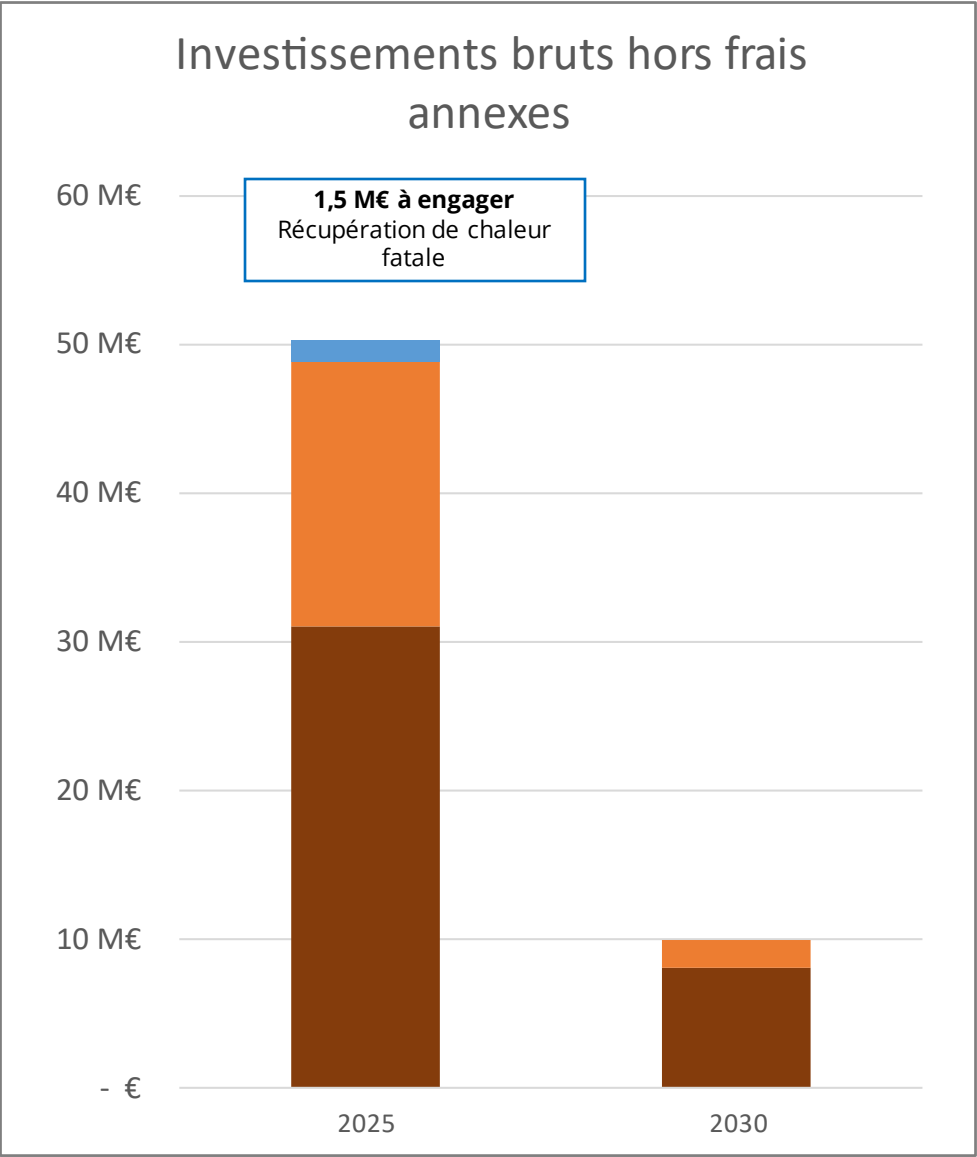
- Les puissances EnR&R à installer en centrale sont dimensionnées afin d'atteindre un taux de couverture de 80% de l'énergie produite en chaud à horizon 2030.
- Dans un premier temps, on considère la récupération de chaleur fatale sur les groupes froids installés en centrale de production (bâtiment 30)

Etape 3 : Récupération d'énergie fatale

Hypothèses de récupération d'énergie fatale

1. Production des besoins froid de base via une première thermofrigopompe (ou sur un groupe froid existant). Les besoins complémentaires (notamment en été) sont produits par le groupe froid en place ;
2. Température de retour du réseau fixée à 65°C (actuellement la température de retour du réseau est de 70°C) ;
3. Valorisation de la chaleur générée lors de la production de froid (par la TFP 1 ou groupe froid) via une seconde TFP. Régime de température de la seconde TFP : 78°C – 71°C ;
4. Complément de production assuré par les chaudières gaz (température de production 85°C).





A horizon 2050

Actions	Investissements	Gaz (GWh PCI)	Electricité	Emission de GES
Développement net du patrimoine	-	-0,4 GWh (-1,4%)	0,6 GWh (3,0%)	-57 tCO2e (-0,7%)
Rénovation des enveloppes	40 M€	-6,6 GWh (-22,5%)	0,0 GWh (0,0%)	-1 506 tCO2e (-19,0%)
Rénovation des équipements	20 M€	-1,8 GWh (-6,0%)	-2,4 GWh (-11,1%)	-538 tCO2e (-6,8%)
Actions efficacité énergétique centrale	35 k€	-0,5 GWh (-1,6%)	-0,1 GWh (-0,3%)	-435 tCO2e (-5,5%)
Renouvellement du réseau de chaleur	6,5 M€	-1,9 GWh (-6,4%)	0,0 GWh (0,0%)	-105 tCO2e (-1,3%)
Récupération de chaleur fatale	1,5 M€	-4,7 GWh (-15,8%)	1,5 GWh (6,8%)	-978 tCO2e (-12,3%)

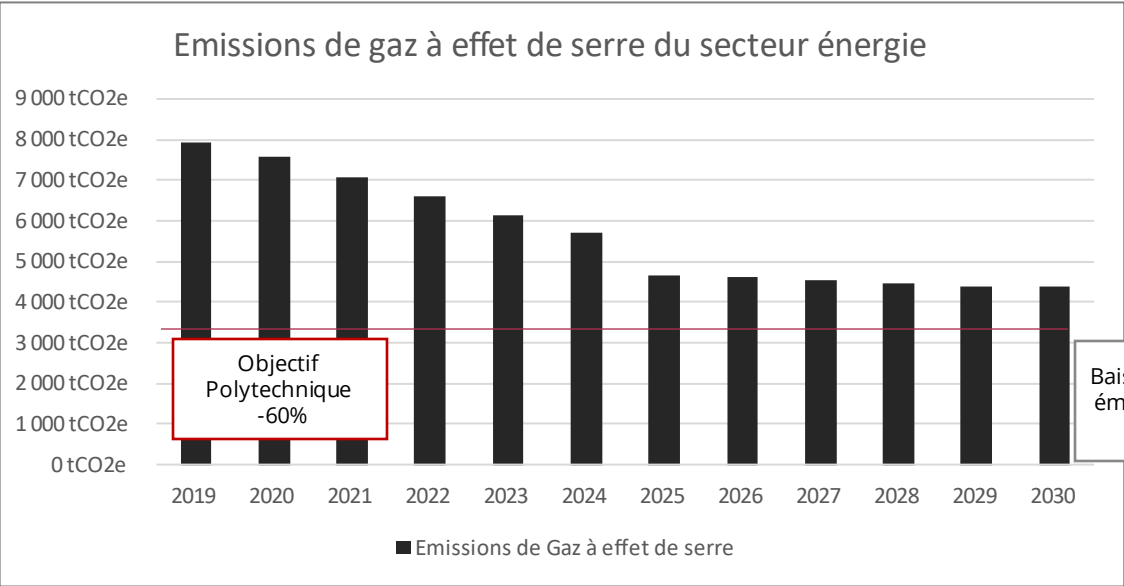
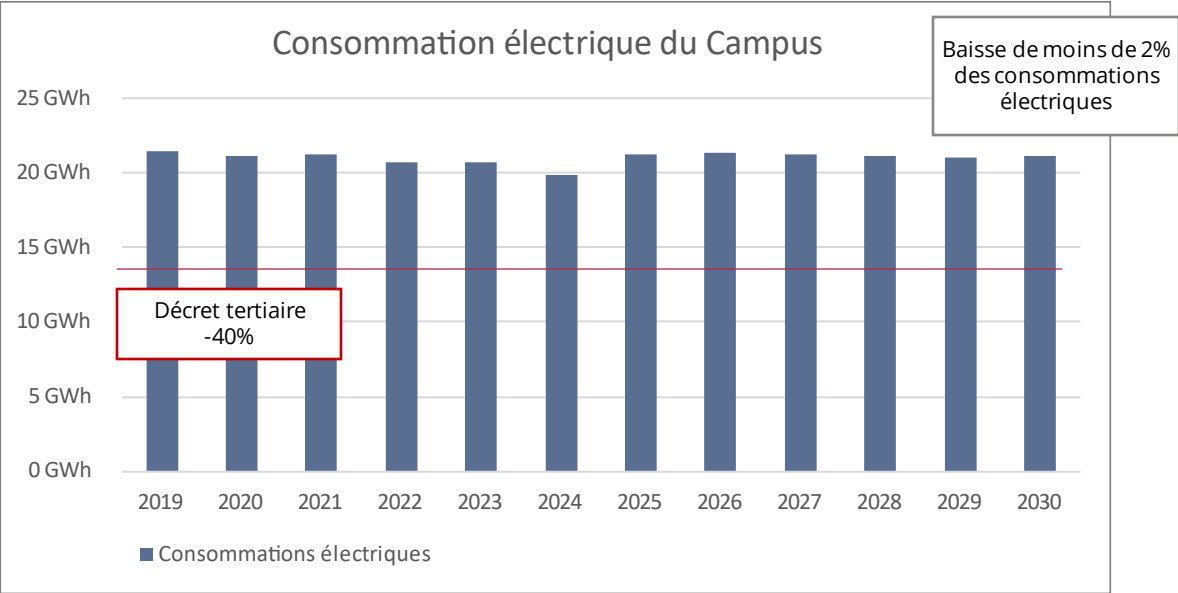
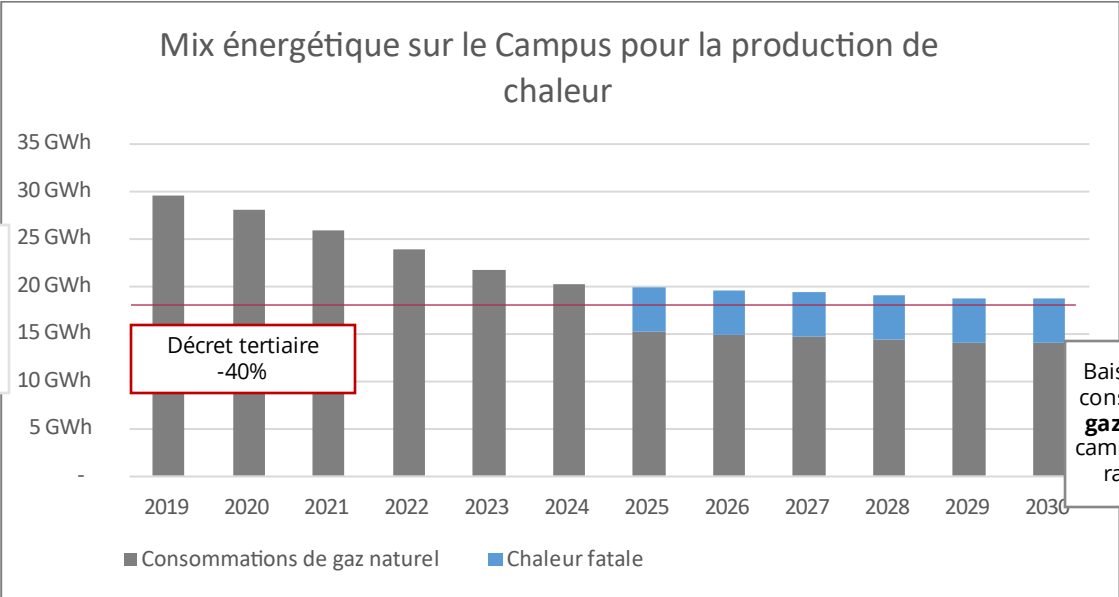
Actions d'efficacité énergétique

- Rénovation des enveloppes des bâtiments
- Rénovation des équipements des bâtiments
- Renouvellement du réseau de chaleur
- Optimisation des outils de production centralisés d'énergie

Productions d'énergie

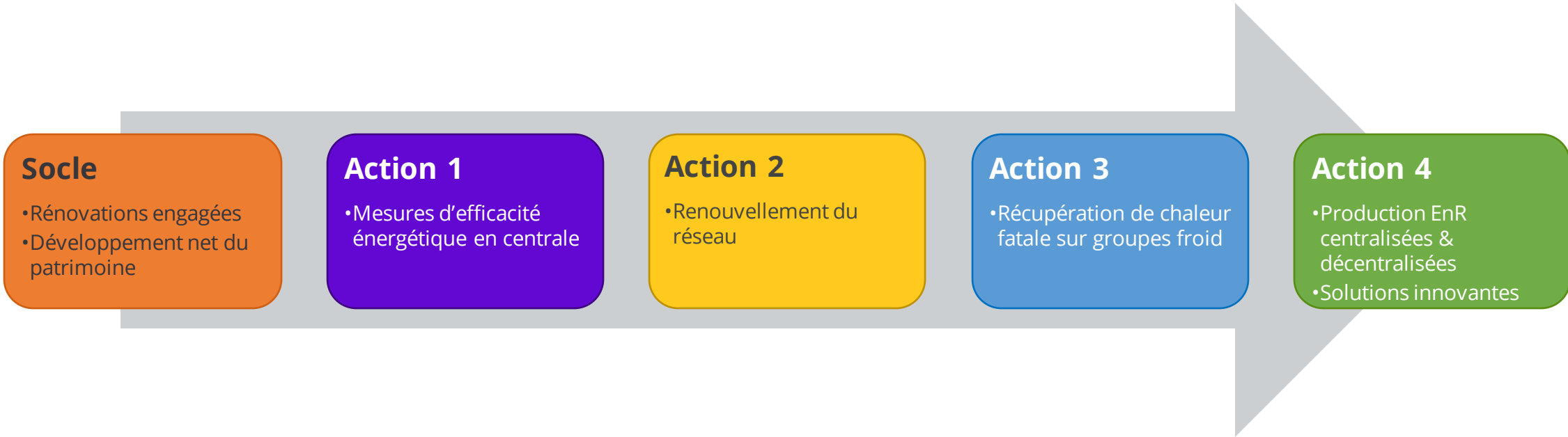
- Récupération de chaleur fatale sur les groupes froid
- Production d'énergie renouvelable
- Achat d'énergie décarbonée (biométhane et/ou électricité décarbonée)

PCI



Impacts

- La récupération de chaleur fatale bien que vertueuse en termes de solution énergétique implique une augmentation de la consommation électrique de l'ordre de 1,5 GWh (5% du campus) due au fonctionnement des pompes à chaleur ;
- Plus le fonctionnement du réseau sera optimisé et la température de retour sur le réseau chaud basse, plus la valorisation de cette chaleur fatale sera efficace ;
- Le cumul des actions permet de réduire de **52% les consommations de gaz et de 45 % des émissions de GES à horizon 2030 par rapport à 2019 ;**



Etape 4 : Production d'énergie renouvelable

Etape 4 : Mise en place de solutions de production d'EnR

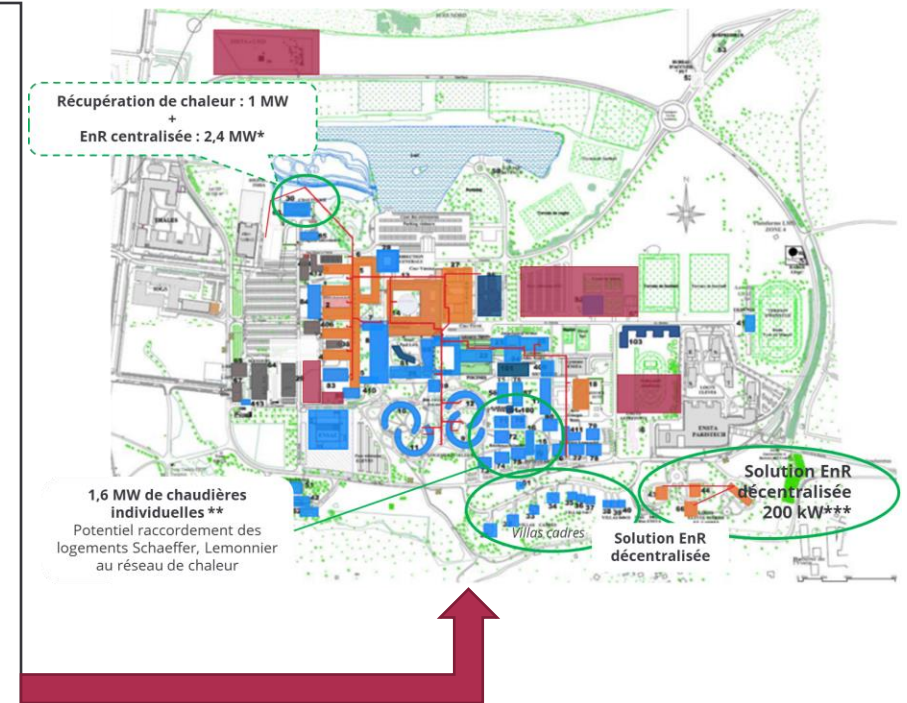
Mobilisation des solutions

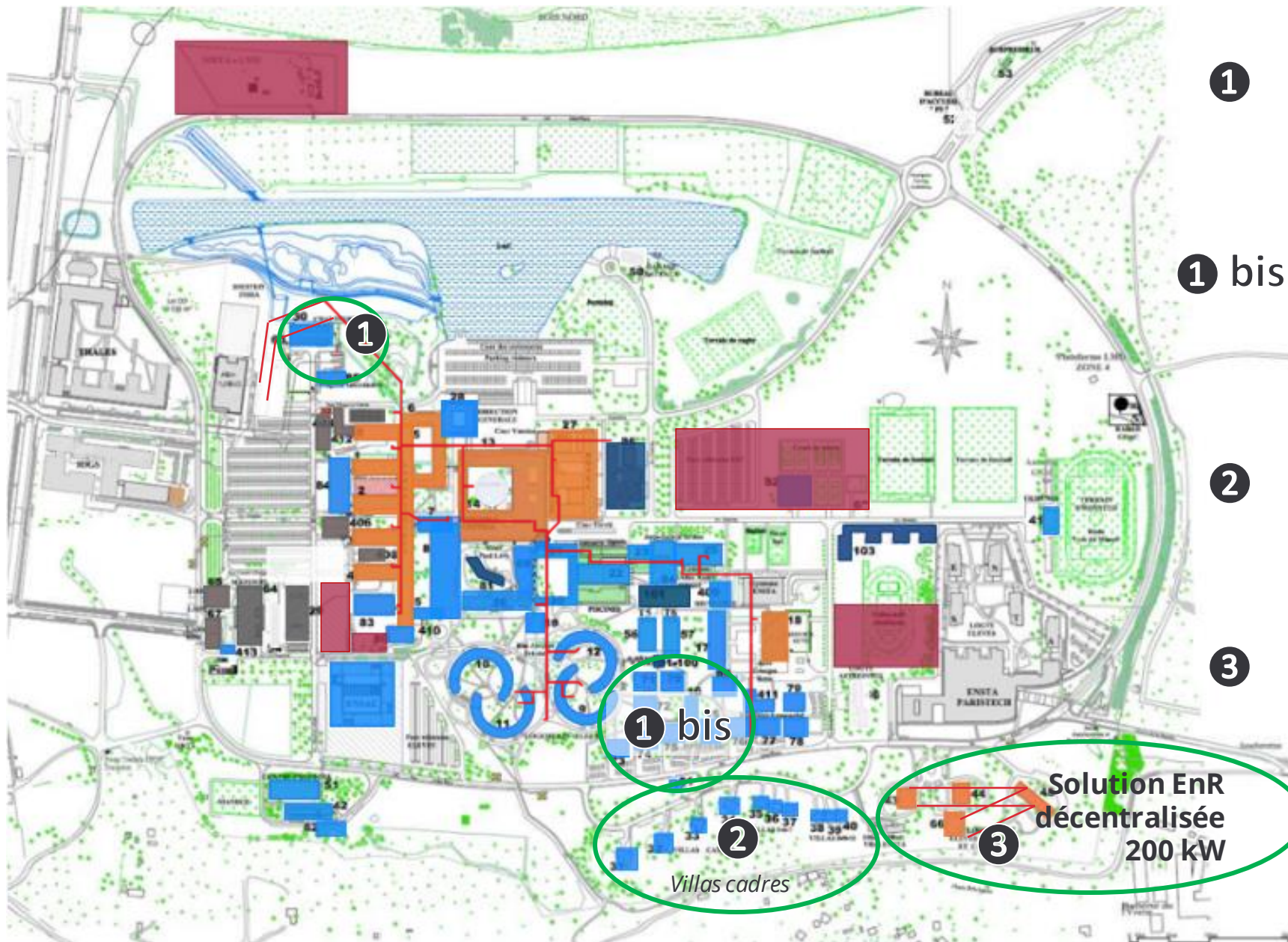
Contribution des actions précédentes :

1. Mise en œuvre des mesures d'efficacité énergétiques permettant de préparer la mise en place de systèmes EnR et de maximiser leur performance.
2. Mise en place d'un plan de renouvellement du réseau permettant de diminuer les pertes de distribution et de favoriser la continuité de service.
3. Récupération des énergies fatales disponibles depuis les installations existantes.

Intégration des solutions renouvelables réparties sur le site :

1. Production centralisée : substituer le gaz naturel par des solutions neutres en carbone/possible mutualisation avec les réseaux à proximité (EPA Paris-Saclay)
2. Réseau : étendre le périmètre de fourniture depuis la centrale de production vers les bâtiments raccordables
3. Systèmes individuels : au cas par cas, remplacer les installations existantes par des systèmes plus performants
4. Productions décentralisées : substituer des chaufferies gaz d'îlot par des solutions EnR innovantes





① Production EnR centralisée

- Biomasse ;
- Géothermie au lutétien.

① bis Extension du réseau

Raccordement des logements Schaeffer et Lemonnier au réseau de chaleur

② Solutions individuelles

- Pompes à chaleur air/air ou air/eau ;
- Chaudières individuelles biomasse.

③ Solution collective décentralisée et/ou innovante *

- Chaudière biomasse
- Géothermie de surface

Solution EnR décentralisée
200 kW

① bis

②

Villas cadres

③

Etape 4 : Mise en place de solutions de production d'EnR

Hypothèses de travail

Puissances appelées sur le réseau de chaleur

- La demande au pas horaire a été estimée à partir des consommations de gaz de la chaufferie principale et des DJU de l'année 2019.
- Les gains énergétiques liés aux actions de performance énergétique sur les enveloppes et les systèmes des bâtiments ont été comptabilisés et contribuent à réduire l'appel de puissance des bâtiments sur le réseau de chaleur de l'Ecole.

Solutions EnR&R

- Les puissances EnR&R à installer en centrale sont dimensionnées afin d'atteindre un taux de couverture de 80% de l'énergie produite en chaud à horizon 2030.
- Les puissances EnR&R à installer sont calculées en fonction des rénovations prévues sur les bâtiments concernés et des actions identifiées en étape 1.

Etape 4 : Mise en place de solutions de production d'EnR



1 Production centralisée

	Chaudière biomasse	Centrale géothermique
Matériel considéré	Chaudière à bois alimenté par de la plaquette forestière. La chaudière peut être intégrée à la chaudière actuelle.	L'installation géothermique au Lutétien (géothermie sur nappe) comprend les puits jusqu'à la nappe, le raccordement jusqu'à la chaudière et la/les pompe(s) à chaleur.
Puissance installée	2,5 à 3 MW	2,8 MW
Investissements bruts hors frais	3,5 à 4,5 M€ ¹	6 M€ ^{2 & 3}
Emprise au sol	>1 000 m² (Y compris stockage bois et accès)	Très faible lorsque les puits sont réalisés. Environ 260 m² par chantier de forage ⁴
Durée de vie	25 ans pour la chaudière	5 ans pour les pompes exhaure prévoir un curage/nettoyage des puits tous les 6-10 ans ³
Données techniques de fonctionnement	Arrêt obligatoire pour maintenance : 1 à 2 semaines par an	3 puits de production (115 m³/h par puit) et 8 d'injection - Profondeur des puits : 50 à 70 m - Température de la nappe : 14 °C - Pompes à chaleur de l'ordre de 3 MW à installer en centrale
Contraintes réglementaires et limitations	- Installation d'une cheminée de 12m minimum - Système de traitement des fumées à intégrer - Plan d'approvisionnement de la ressource biomasse à prévoir - Présence de nombreux véhicules pour l'approvisionnement en période de chauffe	- Etudes de qualité des sols, sur les paramètres physico-chimiques des fluides à mener en amont du projet - Exploitation plus complexe que pour une chaudière gaz - Température de rejet dans la nappe limitée par la réglementation (7°C généralement)
Avantages	- Régimes de températures adaptés au fonctionnement actuel du réseau - Ressource maîtrisée et investissement limité	- Coûts d'exploitation faibles - Possibilité de valoriser la géothermie en été pour la production de froid « renouvelable »
Impacts environnementaux	- Transports assez importants en fonction de la provenance de la ressource - Ressource sensible en région île de France - Construction à fort impact environnemental (béton) sauf si intégré à l'existant	- Mise en œuvre à impact environnemental limité (forage) - Exploitation à très faible impact environnemental

¹ <https://bibliothèque.ademe.fr/energies-renouvelables-reseaux-et-stockage/1371-production-de-chaleur-biomasse-54-exemples-d-installation-biomasse-en-entreprise-9791029711107.html>

² <https://www.geotheimies.fr/sites/default/files/inline-files/Guide%20technique-%20pompe%20C3%A0%20chaleur%20geothermique%20sur%20aquif%C3%A8re-conception%20et%20mise%20en%20oeuvre%20en%20ile%20de%20france.pdf>

³ <http://infoterre.brgm.fr/rapports/RP-60953-FR.pdf>

⁴ http://www.driee.ile-de-france.developpement-durable.gouv.fr/IMG/pdf/AVIS_AE_-_Mairie_de_Bois-Colombes-Exploitation_d_un_gite_geothermique_sur_le_Lutetien_-_ZAC_Pompidou-le-Mignon_a_Bois-Colombes_92_-_18_Oct-_2016.pdf

Etape 4 : Mise en place de solutions de production d'EnR

2 Production individuelle

	Chaudière biomasse	Pompes à chaleur
Matériel considéré	Chaudières biomasse à granulé à chargement automatique	Pompes à chaleur air/air (chauffage par ventilation) ou air/eau (chauffage via plancher chauffant par exemple)
Puissance installée	20-30 kW par villa	20 kW par villa (villas cadres)
Investissements bruts hors frais	22 000 à 25 000 € par modèle ^{2&3}	15 000 € pour un modèle air/eau 10 000€ pour un modèle air/air (fourniture et pose) ¹
Emprise au sol	20 à 30 m² / bâtiment (stockage compris) ²	-
Durée de vie	20 à 25 ans ²	10 ans
Données techniques de fonctionnement	Températures de fonctionnement jusqu'à 100 °C	COP machine de l'ordre de 2,5 à 3
Contraintes réglementaires et limitations	- Installation d'un conduit de cheminée nécessaire au fonctionnement de la chaudière ; - Ventilation obligatoire des espaces de stockage de la biomasse et de la chaudière ² ; - Nécessite un approvisionnement fréquent en biomasse ; - Peu adaptée pour la production d'ECS en été.	- Intérêt limité dans les logements non rénovés ou avec des émetteurs fonctionnant à des plages de température élevées (> 40°C) - Performance en baisse lorsque la température extérieure diminue fortement (nécessite l'installation d'un complément gaz) ¹ - Peut favoriser la création d'ilots de chaleur en été si utilisé pour la climatisation - L'unité extérieure (échangeur extérieur) peut être bruyant
Avantages	Ne nécessite pas l'installation d'un équipement gaz complémentaire	- Pose et entretien relativement simple - Peut être utilisé en réversible pour la production de froid en été
Impacts environnementaux	- Transports assez importants en fonction de la provenance de la ressource - Ressource sensible en région île de France - Construction à fort impact environnemental (béton) sauf si intégré à l'existant	Mode de production et impacts de l'électricité consommée à prendre en considération

¹ <https://www.engie-homeservices.fr/dossiers/pompe-chaleur/caracteristiques/les-avantages-et-inconvenients-dune-pompe-chaleur> & <https://www.quelleenergie.fr/economies-energie/pompe-chaleur-air-air/prix-economies>

² <https://www.jechange.fr/energie/electricite/guides/biomasse-4195>

³ <https://constructeurtravaux.fr/prix-installation-chaudiere-bois/>

Etape 4 : Mise en place de solutions de production d'EnR

③ Production collective décentralisée

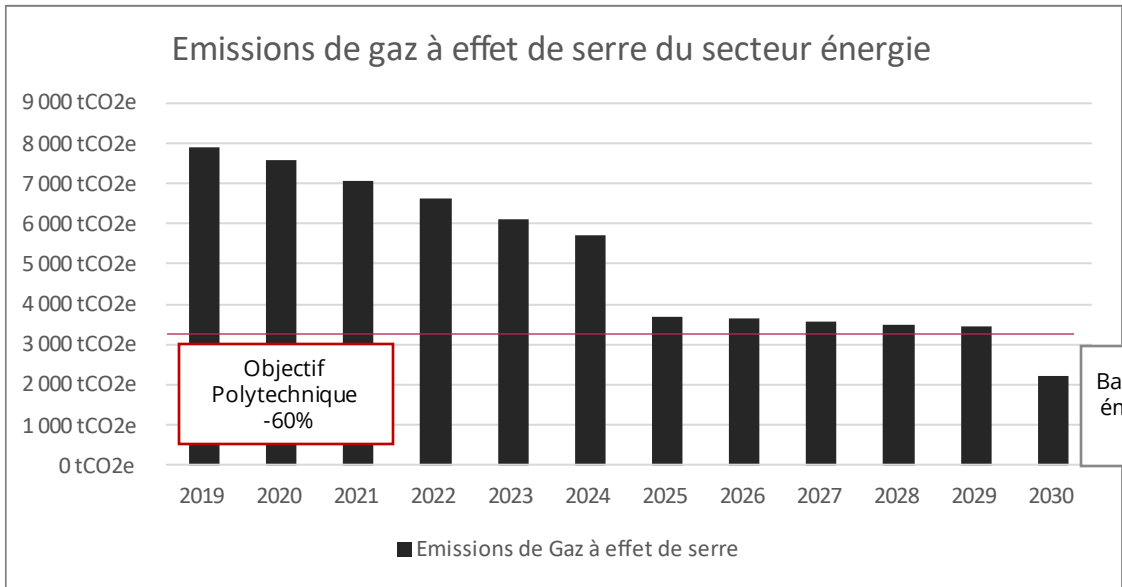
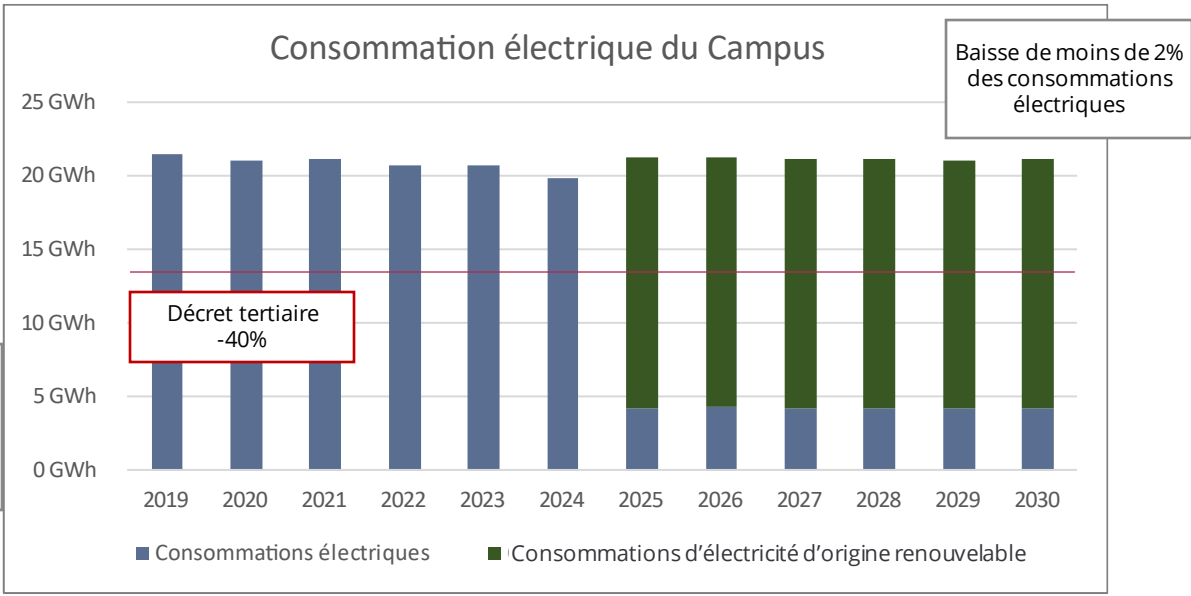
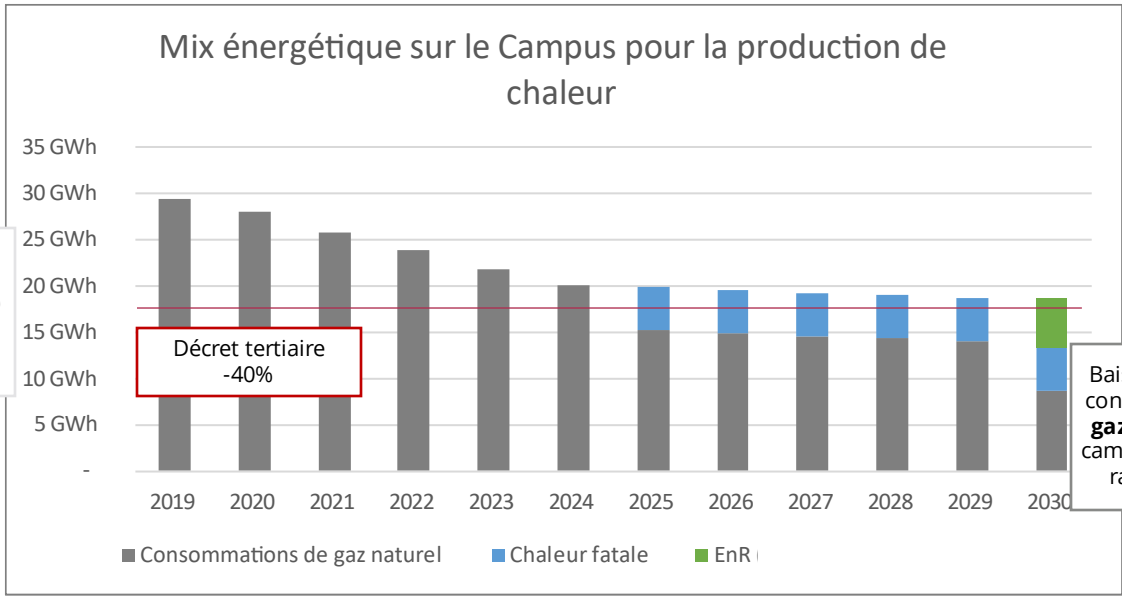
	Chaudières biomasse collective	Géothermie de surface
Matériel considéré	Chaudières biomasse à granulé à chargement automatique	Géothermie sur sondes (profondeur des forages d'environ 80 m)
Puissance installée	200 kW	200 kW
Investissements bruts hors frais	350 000 € ³	500 000 € ¹
Emprise au sol	200 m ² (stockage compris) ^{2 & 3}	Très faible lorsque les puits sont réalisés. Espace pour la PAC de 50 m ² à prévoir.
Durée de vie	20 à 25 ans ²	
Données techniques de fonctionnement	• Températures de fonctionnement jusqu'à 100 °C	• 30 sondes géothermiques verticales allant jusqu'à 80 mètres de profondeur ¹
Contraintes réglementaires et limitations	• Installation d'un conduit de cheminée nécessaire au fonctionnement de la chaudière ; • Ventilation obligatoire des espaces de stockage de la biomasse et de la chaudière ² ; • Nécessite un approvisionnement fréquent en biomasse.	• Etudes de qualité des sols, sur les paramètres physico-chimiques des fluides à mener en amont du projet
Avantages	• Ne nécessite pas l'installation d'un équipement gaz complémentaire	• Coûts d'exploitations plus faibles que dans le cas d'une chaufferie biomasse • Possibilité de valoriser la géothermie en été pour la production de froid « renouvelable »
Impacts environnementaux	• Transports assez importants en fonction de la provenance de la ressource • Ressource sensible en région Île de France • Construction à fort impact environnemental (béton) sauf si intégré à l'existant	• Mise en œuvre à impact environnemental limité (forage) • Exploitation à très faible impact environnemental

¹ <https://www.engie-homeservices.fr/dossiers/pompe-chaleur/caracteristiques/les-avantages-et-inconvenients-dune-pompe-chaleur> & <https://www.quelleenergie.fr/economies-energie/pompe-chaleur-air-air/prix-economies>

² <https://www.jechange.fr/energie/electricite/guides/biomasse-4195>

³ <https://constructeurtravaux.fr/prix-installation-chaudiere-bois/>

PCI



Impacts

- La production d'énergie renouvelable et de récupération (EnR&R) sur le campus doit permettre à termes (2050) d'assurer 80% des besoins énergétiques en chaleur sur le campus ;
- La capacité de production d'énergie électrique renouvelable sur le campus est limitée (peu de surfaces de toitures adaptées). La décarbonation des consommations électriques sera principalement assurée par l'achat d'électricité EnR ;
- Le cumul des actions permet de réduire de **71% les consommations de gaz et de 72 % des émissions de GES à horizon 2030 par rapport à 2019 ;**

Bilan des investissements

Tableau de synthèse frais annexes inclus

	Investissements bruts	Sources	Frais (aléas 20%, études 5% et frais MOE 8%)	Investissements avec frais
Socle - Rénovations engagées & développement net du patrimoine	58 818 576 €	Base de données AMOES	19 410 130 €	78 228 706 €
Action 1 - Mesures d'efficacité énergétique en centrale	35 500 €	Estimations Tilia REX	11 715 €	47 215 €
Action 2 - Renouvellement du réseau	6 350 220 €	Estimations TILIA REX	2 095 573 €	8 445 793 €
Action 3 - Récupération de chaleur fatale sur groupes froids	1 500 000 €	Estimations TILIA REX	495 000 €	1 995 000 €
Action 4 - Production EnR centralisée et décentralisée	5 000 000 €	Voir slides « solution EnR »	1 650 000 €	6 650 000 €
Total	71 704 296 €		23 662 418 €	95 366 714 €

03

Solutions de financement et schémas contractuels

Solutions de financement et gouvernance associée

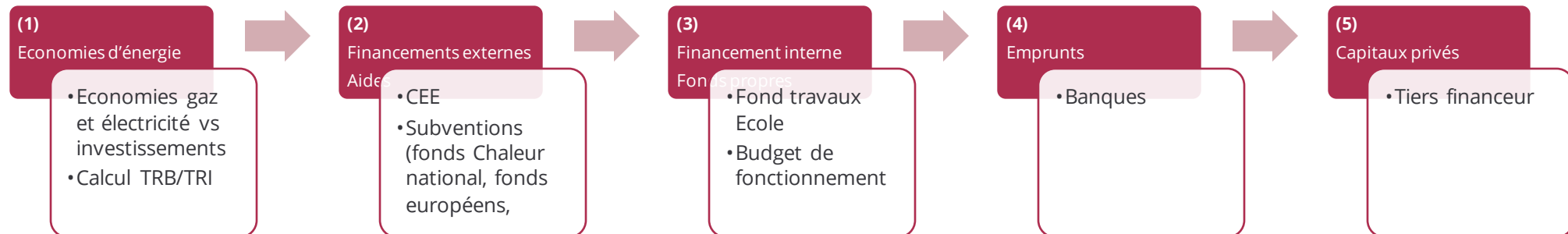
Solutions de financement

Identification des grandes familles de montage possibles

Financement

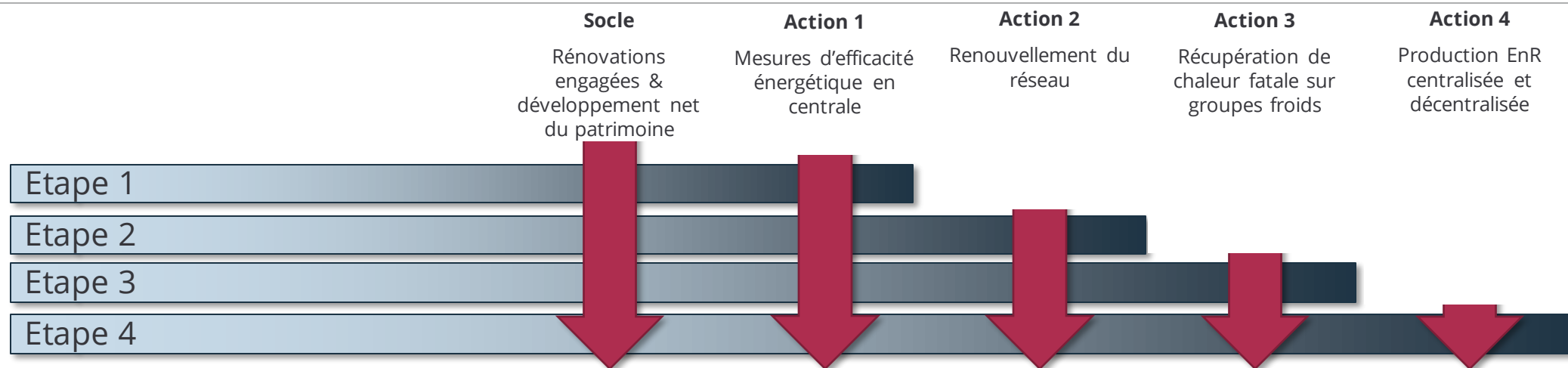
Différents modes de financement des investissements complémentaires

1. **Economies d'énergie auto-générées** : actions d'efficacité énergétiques à l'échelle des bâtiments et des infrastructures
 - Economies gaz (Base factures 2019) : 52 € TTC/MWh PCI
 - Economies électricité (Base factures 2019) : 120 € TTC/MWh el
2. **Financement externes-Aides** : aides et subventions mobilisables suivant les actions mises en œuvre (CEE et subventions)
3. **Fonds propres** : mobilisation de « fonds travaux » ou de fonctionnement selon capacité de l'Ecole Polytechnique
4. **Emprunts bancaires** : selon plan de financement
5. **Capitaux privés** : opérateur tiers



Financement

Economies d'énergie auto-générées



	Socle	Action 1	Action 2	Action 3	Action 4
Investissements de chaque action (frais études, MOE et aléas compris)	78,2 M€	50 k€	8,4 M€	2 M€	6,6 M€
Réduction des consommations de gaz pour chaque action entre 2020 et 2050	245 474 MWh PCI	53 948 MWh PCI	21 855 MWh PCI	120 664 MWh PCI	216 835 MWh PCI
Réduction des consommations d'électricité pour chaque action entre 2020 et 2050	69 331 MWh	2 046 MWh	0 MWh	-47 713 MWh	0 MWh
Economies cumulées réalisées sur 30 ans					
Gaz	10 637 198 €	2 337 758 €	947 069 €	5 228 774 €	9 396 187 €
Electricité	6 933 056 €	204 624 €	- €	- 4 771 289 €	- €

Compensées en partie par la biomasse ou l'électricité consommée

Financement

Subventions mobilisables

CEE : Certificats d'économie d'énergie

Intitulé de l'action	Code	Montant (€)	Statut
Enveloppe	BAR-TH-101	100000	En cours
Enveloppe	BAR-TH-102	100000	En cours
Enveloppe	BAR-TH-103	100000	En cours
Enveloppe	BAR-TH-104	100000	En cours
Enveloppe	BAR-TH-105	100000	En cours
Enveloppe	BAR-TH-106	100000	En cours
Enveloppe	BAR-TH-107	100000	En cours
Enveloppe	BAR-TH-108	100000	En cours
Enveloppe	BAR-TH-109	100000	En cours
Enveloppe	BAR-TH-110	100000	En cours
Enveloppe	BAR-TH-111	100000	En cours
Enveloppe	BAR-TH-112	100000	En cours
Enveloppe	BAR-TH-113	100000	En cours
Enveloppe	BAR-TH-114	100000	En cours
Enveloppe	BAR-TH-115	100000	En cours
Enveloppe	BAR-TH-116	100000	En cours
Enveloppe	BAR-TH-117	100000	En cours
Enveloppe	BAR-TH-118	100000	En cours
Enveloppe	BAR-TH-119	100000	En cours
Enveloppe	BAR-TH-120	100000	En cours
Enveloppe	BAR-TH-121	100000	En cours
Enveloppe	BAR-TH-122	100000	En cours
Enveloppe	BAR-TH-123	100000	En cours
Enveloppe	BAR-TH-124	100000	En cours
Enveloppe	BAR-TH-125	100000	En cours
Enveloppe	BAR-TH-126	100000	En cours
Enveloppe	BAR-TH-127	100000	En cours
Enveloppe	BAR-TH-128	100000	En cours
Enveloppe	BAR-TH-129	100000	En cours
Enveloppe	BAR-TH-130	100000	En cours
Enveloppe	BAR-TH-131	100000	En cours
Enveloppe	BAR-TH-132	100000	En cours
Enveloppe	BAR-TH-133	100000	En cours
Enveloppe	BAR-TH-134	100000	En cours
Enveloppe	BAR-TH-135	100000	En cours
Enveloppe	BAR-TH-136	100000	En cours
Enveloppe	BAR-TH-137	100000	En cours
Enveloppe	BAR-TH-138	100000	En cours
Enveloppe	BAR-TH-139	100000	En cours
Enveloppe	BAR-TH-140	100000	En cours
Enveloppe	BAR-TH-141	100000	En cours
Enveloppe	BAR-TH-142	100000	En cours
Enveloppe	BAR-TH-143	100000	En cours
Enveloppe	BAR-TH-144	100000	En cours
Enveloppe	BAR-TH-145	100000	En cours
Enveloppe	BAR-TH-146	100000	En cours
Enveloppe	BAR-TH-147	100000	En cours
Enveloppe	BAR-TH-148	100000	En cours
Enveloppe	BAR-TH-149	100000	En cours
Enveloppe	BAR-TH-150	100000	En cours
Enveloppe	BAR-TH-151	100000	En cours
Enveloppe	BAR-TH-152	100000	En cours
Enveloppe	BAR-TH-153	100000	En cours
Enveloppe	BAR-TH-154	100000	En cours
Enveloppe	BAR-TH-155	100000	En cours
Enveloppe	BAR-TH-156	100000	En cours
Enveloppe	BAR-TH-157	100000	En cours
Enveloppe	BAR-TH-158	100000	En cours
Enveloppe	BAR-TH-159	100000	En cours
Enveloppe	BAR-TH-160	100000	En cours
Enveloppe	BAR-TH-161	100000	En cours
Enveloppe	BAR-TH-162	100000	En cours
Enveloppe	BAR-TH-163	100000	En cours
Enveloppe	BAR-TH-164	100000	En cours
Enveloppe	BAR-TH-165	100000	En cours
Enveloppe	BAR-TH-166	100000	En cours
Enveloppe	BAR-TH-167	100000	En cours
Enveloppe	BAR-TH-168	100000	En cours
Enveloppe	BAR-TH-169	100000	En cours
Enveloppe	BAR-TH-170	100000	En cours
Enveloppe	BAR-TH-171	100000	En cours
Enveloppe	BAR-TH-172	100000	En cours
Enveloppe	BAR-TH-173	100000	En cours
Enveloppe	BAR-TH-174	100000	En cours
Enveloppe	BAR-TH-175	100000	En cours
Enveloppe	BAR-TH-176	100000	En cours
Enveloppe	BAR-TH-177	100000	En cours
Enveloppe	BAR-TH-178	100000	En cours
Enveloppe	BAR-TH-179	100000	En cours
Enveloppe	BAR-TH-180	100000	En cours
Enveloppe	BAR-TH-181	100000	En cours
Enveloppe	BAR-TH-182	100000	En cours
Enveloppe	BAR-TH-183	100000	En cours
Enveloppe	BAR-TH-184	100000	En cours
Enveloppe	BAR-TH-185	100000	En cours
Enveloppe	BAR-TH-186	100000	En cours
Enveloppe	BAR-TH-187	100000	En cours
Enveloppe	BAR-TH-188	100000	En cours
Enveloppe	BAR-TH-189	100000	En cours
Enveloppe	BAR-TH-190	100000	En cours
Enveloppe	BAR-TH-191	100000	En cours
Enveloppe	BAR-TH-192	100000	En cours
Enveloppe	BAR-TH-193	100000	En cours
Enveloppe	BAR-TH-194	100000	En cours
Enveloppe	BAR-TH-195	100000	En cours
Enveloppe	BAR-TH-196	100000	En cours
Enveloppe	BAR-TH-197	100000	En cours
Enveloppe	BAR-TH-198	100000	En cours
Enveloppe	BAR-TH-199	100000	En cours
Enveloppe	BAR-TH-200	100000	En cours

Une 100aine d'actions éligibles en lien avec les APE identifiées dans le SDE :

- Enveloppe
- Systèmes
- Réseaux
- EnR
- Services



Au moins 1 000 000 € mobilisables selon calculatrice CEE ADEME

Dont :

- BAR-SE-107 :
Abaissement de la température de retour vers un réseau de chaleur
- BAR-TH-165 :
Chaudière biomasse collective
- BAT-TH-155
Isolation de points singuliers d'un réseau
- BAR-SE-106
Service de suivi des consommations d'énergie
- BAR-SE-105
Contrat de Performance Énergétique Services (CPE Services)

Financement

Subventions mobilisables

Subventions d'investissement : elles rémunèrent la mise en œuvre de solutions EnR&R en substitution des énergies fossiles

Compte-tenu du statut et de la tutelle de l'Ecole Polytechnique, nous avons considéré que l'Ecole

Polytechnique serait éligible aux aides de l'Etat (ADEME notamment) et de l'Europe (FEDER notamment).

Financier	Niveau	Objet	Eligibilité	Actions visées	Niveau de subvention
ADEME	National	Fonds Chaleur : subventions sur investissements pour la mise en œuvre de solutions EnR&R et le raccordement de bâtiments à un réseau EnR&R	Démarche EnR'Choix >60% EnR&R	Actions 3 et 4	entre 20 et 30% des investissements éligibles
FEDER	Europe	Fonds FEDER : subventions sur investissements pour la mise en œuvre de solutions EnR&R et le raccordement de bâtiments à un réseau EnR&R en complément au Fonds Chaleur	IDEM	Actions 3 et 4	entre 20 et 30% des investissements éligibles

Entre 2 et 3 000 000 € mobilisables sur les actions 3 et 4

Financement

Subventions mobilisables

Subventions au fonctionnement : elles rémunèrent toutes mesures d'efficacité énergétique ou de développement durable en termes de moyens humains ou matériel en lien avec des projets de rénovation énergétique de bâtiments (ou territoires).

Financier	Niveau	Objet	Eligibilité	Actions visées	Niveau de subvention
FNCCR	National	Programme ACTEE : aides à la rénovation énergétique des bâtiments	A vérifier	Socle à Action 2	jusqu'à 60%
ELENA	Europe	Programme d'aide sur toutes mesures d'efficacité énergétiques pour un plan d'investissement toutes actions confondues de 30 M€ sur 3 ans	IDEM	Socle à action 2	jusqu'à 90% des

1 500 000 € a minima pour toutes mesures, recrutement ou service (prestation) de suivi et d'optimisation des systèmes énergétiques

Financement

Autres financements

Les investissements non couverts par les solutions de financement 1 et 2 font l'objet des financements ci-dessous :

1. Fonds propres
2. Emprunts bancaires
3. Capitaux privés : opérateur tiers

Développé par ADEXEL (Note du 25/02/22)

Leur mobilisation et affectation par action et/ou étape est directement liée aux schémas contractuels et de gouvernance privilégiés par l'Ecole Polytechnique

Schémas contractuels

Selon solutions de financements

	Socle	Action 1	Action 2	Action 3	Action 4
	Rénovations engagées & développement net du patrimoine	Mesures d'efficacité énergétique en centrale	Renouvellement du réseau	Récupération de chaleur fatale sur groupes froid	Productions EnR centralisées et décentralisées
<i>A horizon 2050</i>					
Investissements	80 M€	50 k€	8,4 M€	2 M€	8,9 M€
Economies d'énergie (Sur 30 ans)	17,5 M€	2,5 M€	0,9 M€	-	-
Subventions/Aides (Estimations)	2 M€			2,5 M€	
Solutions contractuelles	MOP : marchés de MOE+marchés de travaux <i>Autres financements : fonds propres/emprunts</i>	MOP : marché d'exploitation-maintenance (P2-P5)	MOP : garantie totale (P3) ou travaux (P5)	MOP : marchés de MOE+marchés de travaux	MOP : marchés de MOE+marchés de travaux
	CPE/MGP (anciennement CREM) <i>Autres financements : fonds propres/emprunts</i>	CPE/MGP (anciennement CREM) incluant travaux de performance	CPE/MGP (anciennement CREM) incluant travaux de performance	CPE/MGP (anciennement CREM) <i>Autres financements : fonds propres/emprunts</i>	CPE/MGP (anciennement CREM) <i>Autres financements : fonds propres/emprunts</i>
	PPP : partenariat public-privé <i>Autres financements : capitaux privés</i>	-	"Concession privée" <i>Autres financements : capitaux privés</i>	"Concession privée" <i>Autres financements : capitaux privés</i>	"Concession privée" <i>Autres financements : capitaux privés</i>
Points à développer	Corrélation entre l'engagement budgétaire bâtiminaire et les mesures d'efficacité énergétiques identifiées	Intégration d'une campagne de mesures en amont ou dans le cadre du marché	Audit spécifique du réseau à mener Plan GER à définir suivant contraintes d'exploitation du campus (réseaux et voiries)	Etudes de faisabilité à mener en amont	Etudes de faisabilité à mener en amont +Possibles mutualisations

Du marché le plus simple au plus complexe

Du portage des investissements par l'Ecole Polytechnique vers un portage tiers

04

Modélisation des Investissements et appréciation des éléments de financement

Coûts, économies et Solutions de financement associées

Contexte et méthodologie

Financer la réduction des émissions carbone à horizon 2030

Le Schéma Directeur Energétique (S.D.E.) est l'outil de pilotage stratégique de l'école Polytechnique lui permettant d'atteindre ses engagements 2030 dans la réduction de ses émissions de CO2.

Ce schéma pluriannuel répond à des enjeux de pilotage stratégique et écologique et abonde la stratégie de gestion du patrimoine de l'Ecole. Ce document de pilotage stratégique s'appuie entre autre sur :

- Le Schéma Directeur Immobilier (S.D.I) de l'Institut Polytechnique (I.P.) de Paris,
- Le Schéma Pluriannuel de Stratégie Immobilière (S.P.S.I) de l'école Polytechnique.

Dans le cadre de ces deux Schémas directeurs, une enveloppe de 157M€ d'investissement est identifiée pour laquelle l'Etat investirait 87M€.

Le S.D.E. participe à la réalisation de la Stratégie Immobilière long terme de l'école Polytechnique et, plus largement de l'Institut. Dans le cas présent, le Schéma contribue à la déclinaison de la stratégie Immobilière dessinée dans le S.D.I. de L'I.P. Paris. Le S.D.E. permettra par ailleurs, d'abonder le futur S.P.S.I. de l'école.

Les éléments scénaristiques développés par le Groupement ont amené à la **définition d'un protocole d'intervention articulé autour d'un Socle et de 4 actions distinctes pour un coût global de près de 103M€.**

A l'échelle du financement, sur **l'enveloppe de 87 M€ initialement prévus pour les 2 schémas directeurs (SDI + SPSI) 43M€ (50% du montant global) seraient fléchés sur le Schéma Directeur Energétique. Ainsi, un montant d'environ 60M€ serait encore à trouver.**

Le présent document a donc pour enjeu de **reprendre les différentes actions du SDE, de les modéliser afin d'en apprécier :**

- **Le coût global ;**
- **Le possible retour sur investissement et sa temporalité ;**
- **Les opportunités de financement et les possibles impacts en terme de montage financier et de gouvernance.**

Méthodologie déployée

Apprécier l'équilibre du SDE pour spécialiser les financements selon les axes d'intervention et les ambitions de l'école



Reprise des éléments de production par le groupement et par le partenaire Tillia :

1. **Définition d'un scénario Etalon** : reprise des éléments historiques afin de prendre en compte un scénario de base permettant **d'objectiver les écarts induits par** :
 - Les investissements
 - Les coûts de consommation
2. **Projection des Investissements et des consommations énergétiques à l'échelle globale** (ensemble des actions + socle) avec en ligne de mire la réponse à **trois questions essentielles** :
 - « *Les gains d'exploitation assurés par la réalisation des investissements assurent-ils le financement des investissements* »
 - *Quels sont les impacts des investissements identifiés dans les scénarios sur le plan de l'exploitation par rapport au scénario 0?*
 - *Quels sont les impacts liés aux financements et quelles marges de manœuvre peut-on trouver à l'échelle du financement et de la structuration des projets?*
3. **Sur la base des éléments identifiés dans le cadre de la phase 2, les conclusions et préconisations** quant aux montages et leviers d'actions seront fournies afin :
 - **De mobiliser des financements idoines** relativement à l'objet (volume, durée, modalités de déblocage) ;
 - **De définir le / les modèles juridiques les plus appropriés et permettant à l'Ecole X d'optimiser les appels de fonds lorsque c'est nécessaire.**

Méthodologie déployée

Focus – Intégration d'une indexation des prix /
Simulation de l'inflation

Les données modélisées dans les diapositives suivantes intègrent les données d'économie d'énergie et d'investissement modélisées dans les phases précédentes par le Groupement.

Afin **d'avoir une vision complète** de la situation, de **mettre en relief les investissements et l'impact des consommations** futures de chaque scénario, **une indexation des prix a été simulée.**

Cette **indexation se base sur des données historiques produites par l'INSEE** (base de prix 2015) : « Les indices des prix à la consommation ».

La période d'observation retenue par le groupement couvre l'intervalle 2010 – 2021 avec :

- **Les indices mensuels** pour les indices de Gaz et Electricité ;
- **Les indice Trimestriels pour l'ICC** (Indice des Coûts de Construction)

Domaine	Numéro INSEE	Période observée	Taux de croissance annuelle	Taux de variation des indices entre 2010-2021
Gaz	001763557	Janvier 2010 -	3,31%	43,04%
Electricité	001763553	Décembre 2021	3,57%	47,15%
Cout de construction	Indice du coût de la construction (ICC)	T1-2010 - T3-2021	2,06%	25,16%

Méthode : sur l'intervalle 2022 – 2050 projection des coûts de consommation (Gaz et électricité) et de **coûts d'investissement intégrant une hausse annuelle de:**

- **3,31% pour le Gaz ;**
- **3,57% pour l'électricité ;**
- **2,06% pour les investissements.**

Rappel théorique

Rappel des composantes d'un modèle économique

Un modèle économique c'est quoi ?

3 données ESSENTIELLES

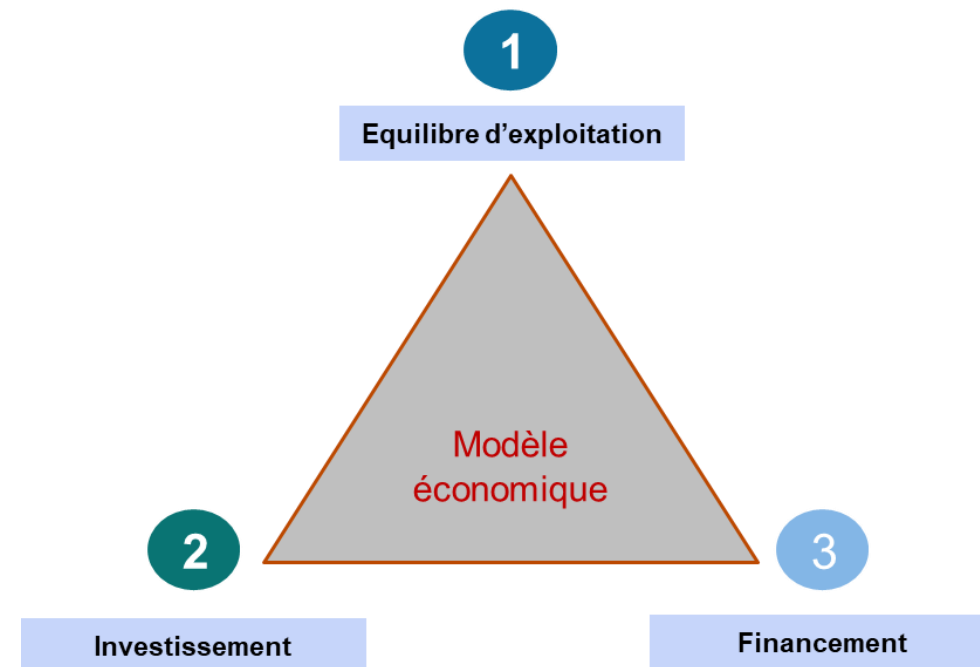
1- Equilibre d'exploitation : donnée essentielle dans la réalisation d'un modèle économique. Indicateur clef = **Excédent Brut d'Exploitation** représente le solde entre les produits et les charges d'exploitation avant de prendre en compte l'érosion de l'outil de production. Ce solde indique la trésorerie générée, ou le déficit de trésorerie créé, par l'exploitation pour une structure et une période donnée.

2- Investissement : force ou outil de production. Se traduit par un montant d'actif. Regroupe :

- L'achat du foncier
- La réalisation des travaux
- Les frais d'études / B.E.T.
- ...

3- Financement : assure le financement de l'investissement. Les sources de financement sont diverses : Fonds propres, Endettement, Apports en Nature etc...

Les échéances sont théoriquement remboursées par la marge d'exploitation réalisée.



Rappel des composantes d'un modèle économique

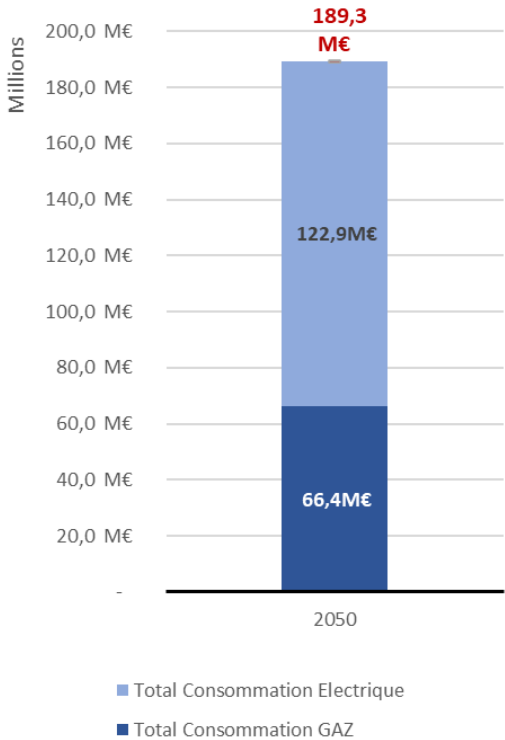
Modèle projet : <u>faiblement</u> générateur de ressources financières	Modèle projet : <u>modérément</u> générateur de ressources financières	Modèle projet : <u>bénéficiaire</u> et générateur de ressources financières
Investissement Réalisé majoritairement par un acteur public sans objectif de rentabilité .	Investissement Réalisé par des acteurs publics et privés . - Objectif prioritaire n'est pas de réaliser de la rentabilité - Volonté d'équilibrer le financement	Investissement Réalisé principalement par des acteurs privés ; objectif = dégager de la rentabilité - Maximiser l'effet de levier et le retour sur investissement
Exploitation Minimisation du tarif / prix proposé afin d' assurer une accessibilité de l'offre (produit et/ ou service) au plus grand nombre ; permettant d'atteindre des objectifs de génération de ressources propres fixés par les porteurs (publics) du projet	Exploitation Optimisation des charges et produits d'exploitation afin : - Attirer des acteurs économiques influant sur la valeur de l'offre - Obtenir un équilibre d'exploitation	Exploitation Optimisation des charges et des produits d'exploitation afin : - Proposer une offre en adéquation avec le marché (prix / niveau de service) - Optimisation du résultat d'exploitation
Impact Modèle économique = centre de coûts Nécessité de fonds disponibles importants pour l'investissement et l'exploitation.	Impact Modèle économique = Équilibré Nécessité de calibrer les éléments du projet pour assurer un équilibre et une pérennité entre les composantes Investissement, financement et exploitation .	Impact Modèle économique = Bénéficiaire Calibrage et Optimisation des composantes Investissement, financement et exploitation afin de dégager de la trésorerie et de la rentabilité pour le porteur de projet

Analyse de l'équilibre global du SDE

Rappel : Le scénario « Etalon » correspond à un scénario où aucune action n’est menée à l’exception d’une variation du patrimoine (diminution et augmentation de la SP).
Variable commune à l’ensemble des scénarios.

Evolution de la SP sur l'intervalle 2021-2050		
Surface de plancher en 2021	191 309	m² SP
Construction	65 000	m² SP
Déconstruction	9 735	m² SP
Variation de la SP sur l'intervalle 2021-2050	55 265	m² SP
Surface de plancher en 2050	246 574	m² SP
Variation %	29%	

Source : Sur la base des actions socle du SDE



Dans le scénario Etalon, les consommations annuelles moyennes ressortent :

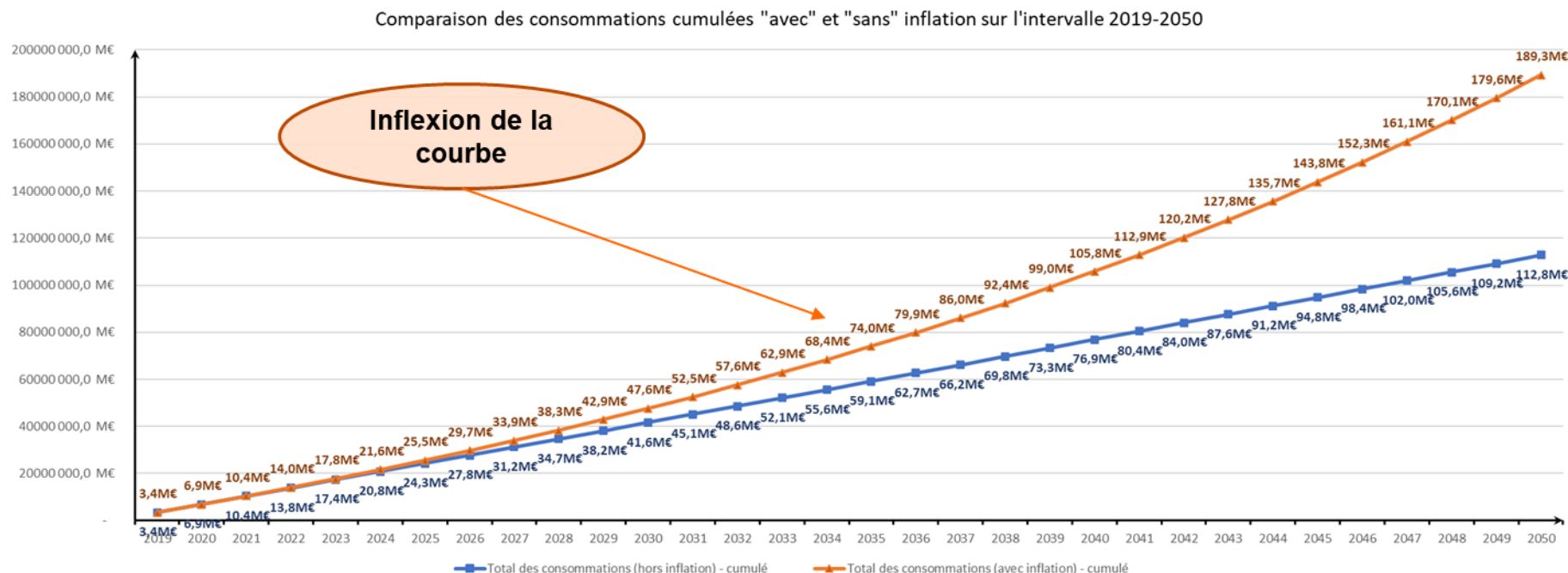
- Pour le **Gaz à hauteur de 29 437 MWh**, soit un **montant annuel** consommé moyen (après inflation) **d'environ 2 M€** sur la période ;
- Pour **l'Electricité à hauteur de 22 499 MWh** avec un montant annuel (après inflation) d'environ **3,8 M€ sur la période**.

In fine, dans le cadre du scénario « étalon », **c'est un montant de consommations énergétiques de 5,9 M€ moyen/an**, et qui ressort à hauteur de **189M€ cumulés sur la période de 2019 à 2050**.

Ratios de consommation au m² de SP			
2021		2050	
MWh / m² SP	€ / m² SP	MWh / m² SP	€ / m² SP
0,2713	18,28 €	0,2150	39,55 €
		-21%	116%

Scénario « ETALON »

Analyse de l'effet de l'inflation



La prise en compte de **l'évolution des prix dans le cadre des projections implique un écart de près de 77 M€ à horizon 2050**, soit près de 60% de différence.

L'inflexion de la courbe désigne le moment où l'écart entre la courbe orange et bleue tend à augmenter en lien avec :

- **La hausse des consommations globales**, liée à la hausse du patrimoine et à la surface de plancher,
- **L'indexation elle-même.**

Scénario de développement patrimonial retenu

5 axes d'intervention identifiés



Le scénario identifié par l'école Polytechniques est modélisé sur le plan technique par le partenaire Tillia intègre 5 axes d'intervention spécifiques :

- **Une intervention « Socle »** destinée à réhabiliter le patrimoine existant articulé autour :
 - De l'amélioration de l'enveloppe des bâtiments;
 - Des équipements;
 - Des sorties futures des bâtiment patrimoine
- **Action 1:** Mesures d'efficacité énergétique en centrale
- **Action 2 :** Intervention sur les « Réseaux chaud / froid »;
- **Action 3 :** Récupération de chaleur fatale sur les groupes froid ;
- **Action 4 :** Développement des E.N.R.
 - Développement d'un projet ENR avec modélisation d'une chaudière Biomasse ;
 - Achat d'électricité certifiée décarbonée

Scénario de développement patrimonial retenu

Focus - Montants d'investissement identifiés et inflatés



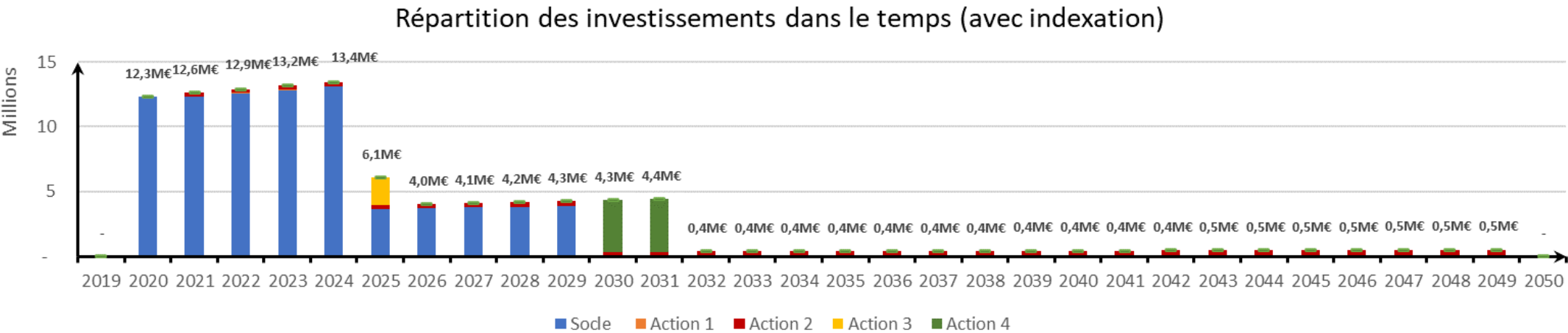
Le montant total des investissements identifiés à 103,6 M€ inclus :

- Les éléments d'investissements bruts ;
- Les frais et aléas (environ 30% du volume global des investissements);
- L'augmentation des prix liée à l'inflation (critère ICC).

	€ / action
Socle	81 945 763
Action 1	48 547
Action 2	11 402 561
Action 3	2 164 644
Action 4	8 072 776
Montant d'investissement	103 634 292

Le graphique ci-dessous présente la temporalité des dépenses réalisées. Les données soulignent l'importance des actions lors de la première décennie.

Les chiffres présentés dans la diapositive n'intègrent pas les éléments de financement (crédit / subventions / économies générées par les investissements).



Scénario de développement patrimonial retenu

Focus - Quantification des économies identifiées par action (avec inflation)

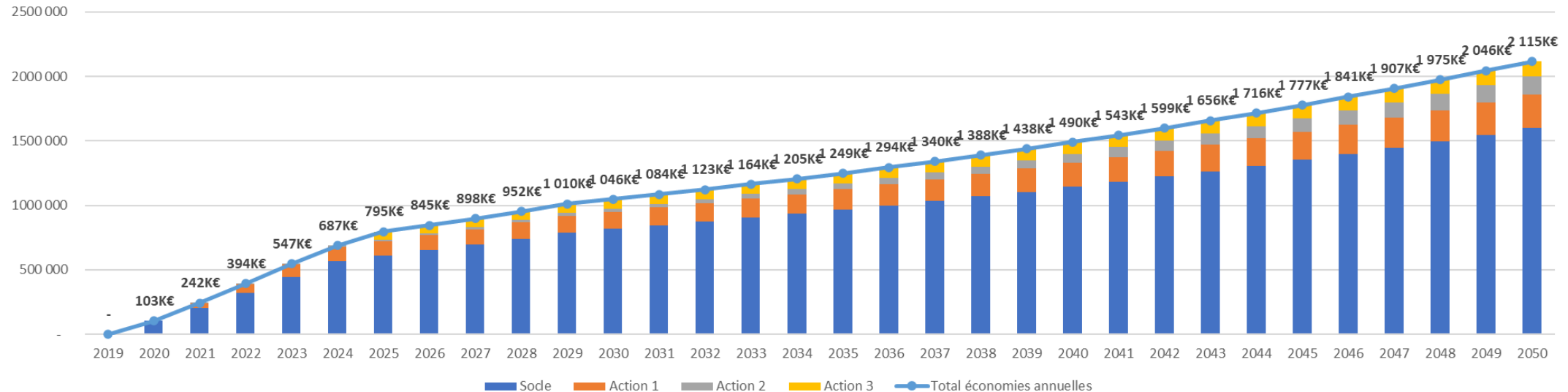


En terme d'économie d'énergie, le programme permet **d'identifier deux catégories d'actions** :

- **Les actions qui vont générer des économies sur la durée, actions socle 1/2/3 en euros;**
- **Les actions qui n'assurent pas d'économies en euros, mais génèrent des externalités positives par le changement d'approvisionnement.** Il s'agit de l'action 4 qui assure :
 - Un approvisionnement en électricité décarbonée ;
 - La production de gaz à partir de la biomasse grâce à l'investissement dans une centrale locale.

Actions Socle + 1/2/3

Analyse des économies annuelles réalisées



Scénario de développement patrimonial retenu

Focus - Quantification des économies identifiées par action (avec inflation)



Actions Socle + 1/2/3 (suite)

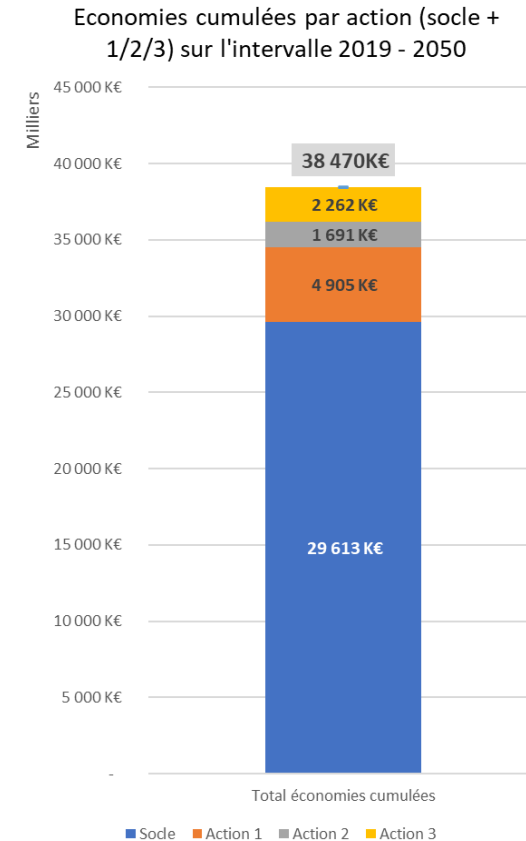
Les actions socle + 1/2/3 permettent de générer en moyenne une économie d'environ 1,2 M€ / an.

La vitesse de croisière est atteinte à partir de l'année 2028 et la fin du programme socle.

Le programme « socle » engendrerait la plus grande partie des économies sur le plan financier, en volume, avec au total 29,6 M€. Cet élément est **à mettre en relation avec les dépenses d'investissement** réalisées pour cette action. Elles sont **estimées à hauteur de 82 M€, soit environ 36%** (après application de l'ICC), mais **en dehors des frais liés au financement** (intérêts et remboursement en Capital estimés dans une seconde partie d'étude).

Le deuxième post d'économies identifié correspond à l'action 2 « Mesures d'efficacité énergétique en centrale ». Cette **action** ressort comme **la plus génératrice de revenus au regard des dépenses d'investissement** prévues, environ 50K€.

Rappel : Montants calculés sur la base des éléments identifiés par Tilia et indexés à partir des taux présentés en amont de ce document.



Scénario de développement patrimonial retenu

Focus - Quantification des économies identifiées par action (avec inflation)

Action 4

L'action 4 vise au remplacement d'une partie de la consommation énergétique par des sources d'approvisionnement décarbonées.

Les deux options envisagées sont les suivantes :

- **La fourniture d'électricité certifiée décarbonée** ; En première approche il semble que cette source d'approvisionnement, générant un certificat, soit plus onéreuse que l'électricité sans certificat. A dire d'expert, le surcoût sur la facture électrique ressort à hauteur d'environ 5%.

Soit avant inflation le passage d'un MWh de 100€ à 105€. Cet élément génèrerait un surcoût moyen sur la période observée d'environ :

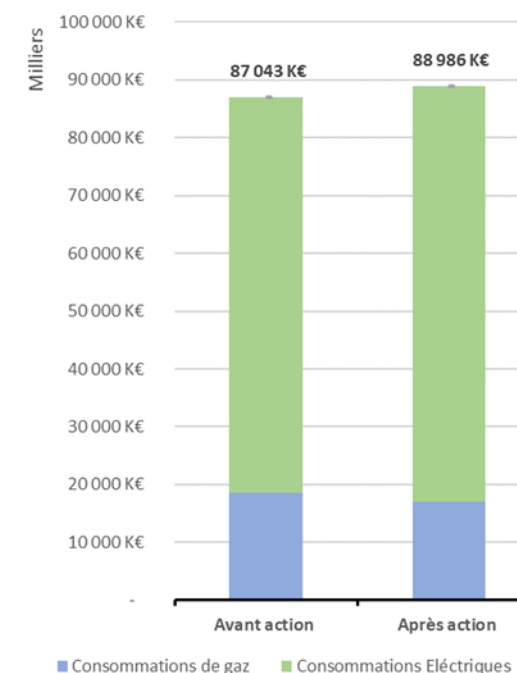
- 60K€/an avant inflation;
- 107K€/an après inflation.

- **La production de gaz grâce à l'investissement dans une centrale biomasse locale.** Dans une première approche, nous avons évalué que le **coût d'approvisionnement** du MWh pourrait **diminuer d'environ 8% en passant de 43,33€/MWh à 39,87€/MWh.**

Par ailleurs, l'investissement dans ce type d'infrastructure pourrait permettre à terme :

- L'abaissement du coût environnemental par MWh consommé ;
- La recherche d'un équilibre entre prix de vente du MWh et rentabilité du projet pourrait être trouvé.

Variation des consommations liées à l'action 4



Constat :

Faible impact à la hausse de ce scénario

Scénario de développement patrimonial retenu

Equilibre général, hors moyens de financement mobilisés



	Equilibre économique globale		
	Investissement	Economies identifiées	différence
Socle	81 945 763	29 613 083	52 332 680
Action 1	48 547	4 904 737 -	4 856 190
Action 2	11 402 561	1 690 504	9 712 058
Action 3	2 164 644	2 261 843 -	97 198
Action 4	8 072 776 -	1 942 516	10 015 292
Total	103 634 292	36 527 650	67 106 641

Les premiers éléments d’appréciation du coût global du projet soulignent :

- Un **montant d’investissement** évalué à hauteur de **103,6M€**, après indexation ;
- **Des économies réalisées à l’échelle des consommations énergétiques**, qui ressortent cependant **inférieures au montant des investissements**. Cet élément implique à l’échelle globale une absence de « retour sur investissement »;
- **Des lignes d’investissement spécifiques générant**, proportionnellement aux volumes des fonds mobilisés, **d’importantes sources d’économies**. Cet élément pourrait permettre :
 - D’externaliser tout ou partie de l’investissement assurant un possible allègement du coût global d’investissement ;
 - L’externalisation et l’optimisation de l’exploitation permettant :
 - De garantir des économies effectives par un engagement du tiers prestataire ;
 - D’économiser les ressources mobilisées en interne (Ressources humaines, temps d’agent...).

Les éléments d’optimisation des moyens de financement et d’exploitation sont abordés dans les pages suivantes du présent document.



Scénario de développement patrimonial retenu



Modélisation du financement et coût global avec l'intégration du financement – hypothèses retenues

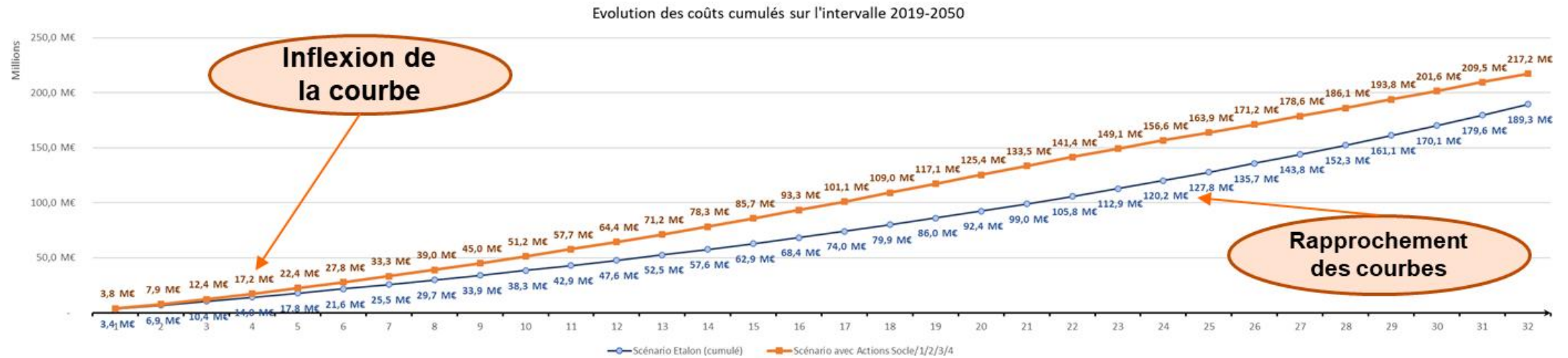
Pour apprécier le coût global possible du financement des actions sur le patrimoine par l'école Polytechnique, **nous avons simulé un mix de financement**. Le mix de financement **se composerait** de la sorte :

- **Ligne Budgétaire prévue par l'Etat** identifiée à hauteur de 87M€. Nous avons retenu une quote-part destinée à la réalisation des actions Socle/1/2/3/4 à hauteur de 50%. **Soit un montant de financement pour les 5 actions à hauteur de 43 M€.**
- **Mobilisation et perception de subventions à hauteur de 5 M€ :**
 - FNCCR et ELENA : 1,5M€ pour les actions Socle/1/2
 - ADEME et FEDER : : 2,5M€ pour les actions ¾
 - Versement de CEE avec ADEME : 1M€
- **« Reste à financer »** identifié à hauteur de 55,6M€ ; Ce reste à financer a été modélisé sur la base d'un emprunt Moyen Long Terme avec les caractéristiques suivantes :
 - Une dette mobilisée sur la même temporalité que les opérations d'investissement
 - Une durée d'amortissement de 20 ans, correspondant aux standards et permettant la réalisation des premières économies d'énergie
 - Un taux de 1,5%.

Les éléments d'optimisation des moyens de financement et d'exploitation sont abordés dans les pages suivantes du présent document.

Scénario de développement patrimonial retenu

Synthèse - Coût cumulés



Sur la **base des hypothèses retenues et des informations** à notre disposition, **il ressort du SDE** :

- **Un écartement des courbes à partir de 2023**, (scénario « étalon » vs. scénario avec « Actions Socle/1/2/3/4 ») **en lien avec la réalisation des investissements** ;
- **Une réduction de l'écart entre les deux scénarios à partir de 2042** en lien avec :
 - La hausse du coût de l'énergie (intégrée par le levier de l'inflation);
 - Les économies d'énergie réalisées qui gagnent en importance.

Scénario de développement patrimonial retenu



Synthèse - Comparaisons des consommations entre les scénarios

	2021	2050 Scénario Etalon	2050 Actions "socle/1/2/3/4"
MWh / m² SP	0,271	0,215	0,137
€ / m² SP	18,28 €	39,55 €	31,47 €
Variation 2021 vs. Scénarios (MWh)		-21%	-50%
Variation 2021 vs. Scénarios (€)		116%	72%
Variation "2050 Etalon" vs. "2050 Socle/1/2/3/4" (MWh)			-36,4%
Variation "2050 Etalon" vs. "2050 Socle/1/2/3/4" (€)			-20,4%

La comparaison des consommations permet d'identifier plusieurs tendances :

- **D'abord, constat d'une diminution globale du ratio de consommation m² dans les deux scénarios**, avec un passage en 2050 à :
 - 0,215MWh/m² de SP pour le scénario « Etalon »
 - 0,137MWh/m² de SP pour le scénario « Actions ».

La baisse des consommations MWh/m² serait 36,5% supérieure dans le scénario « 2050 Actions – Socle/1/2/3/4 ».

A noter : La baisse des consommation du scénario « Etalon » s'explique par l'augmentation du patrimoine et l'intégration de bâtiments neufs, moins énergivores.

(Les données à disposition ne permettaient pas d'isoler les consommations pour les nouveaux bâtiments)

- **Enfin, le scénario « Actions » subit une augmentation moins forte de son ratio « € de consommation /m² de SP ».**
Cet élément s'explique par la baisse des consommations liée à ce scénario (augmentation de 72% vs. 116% en « Etalon »).
Grâce aux réductions de la consommation d'énergie, la hausse du cout €/m² de SP est 20% moins importante dans le scénario « Actions » que dans le scénario « Etalon »



Scénario de développement patrimonial retenu

Synthèse - trésorerie mobilisée

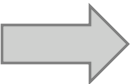


Sur la base des hypothèses retenues et des informations à notre disposition, il ressort que la trésorerie mobilisée pour le SDE s’articule autour :

- D’un **montant d’investissement de 103,6M€** ;
- **Des opportunités de Financement à hauteur de 48M€ tirés par :**
 - Des mises à disposition par l’Etat (43M€)
 - Le levier de Subventions (5M€) ;
- **Des économies sur les charges d’exploitation à hauteur de 36,5M€** ;
- Un **coût de mobilisation du crédit bancaire (55,6M€, 1,5% sur 20 ans)** sur la durée à hauteur de **9,1M€**.

	Scénario "Etalon"	Scénario "socle/1/2/3/4"
Montant d'investissement identifié	-	103 634 292
Moyens de financement mobilisés	-	112 734 822
Moyens de financement déjà identifiés	-	48 000 000
Montant de financement Etat	Non applicable	43 000 000
Montant de subvention perceptible	Non applicable	5 000 000
Moyens de financement modélisés	-	64 734 822
Reste à financer	Non applicable	55 634 292
Coût du crédit		9 100 530
Coût d'exploitation (Consommation énergie)	189 323 921,82	152 796 271
Trésorerie mobilisée	189 323 922	265 531 093
Van 4% du Scénario	94 088 165 €	162 201 555 €

76 207 171
68 113 390



Différence des flux de trésorerie mobilisée entre les deux scénarios :

- 68,1 M€ après application de la VAN à 4% (Taux préconisé par l’Etat dans le cadre des S.D.I. – notice 2018)
- 76,2 M€ avant actualisation



Scénario de développement patrimonial retenu



Synthèse - Appréciation du Coût Global vs. scénario Etalon

Synthèse

En l'état des hypothèses retenues, le scénario « Socle/1/2/3/4 » ressort à hauteur de 28,2M€ pour l'X avant optimisation du financement (action 4). La comparaison entre les deux scénarios ci-dessus :

- Intègre la réduction des consommations et leurs impacts économiques ;
- Intègre la diminution des G.E.S. induite par la réfection des bâtiments ;
- Mais n'intègre pas :
 - Les surcoûts éventuels liés au G.E / G.R. sur le patrimoine
 - Les externalités négatives liées à un patrimoine vieillissant et non performant sur le plan énergétique.

		Scénario Socle/1/2/3/4	Scénario Etalon
+	1	Montant d'investissement identifié	103 634 292
	2	Moyens de financement mobilisés	- 38 899 470
		Subvention et financement de l'Etat	- 48 000 000
		Coût de l'emprunt	9 100 530
	3	Coût d'exploitation (Consommation énergie)	152 796 271 189 323 922
		Coût total	217 531 093 189 323 922



Opportunités de financement par action

Opportunités de financement/montage par catégorie d'action

Focus - Action Socle/1/2/3



Le Marché Global de Performance

Le **contrat MGP** permet **d'associer la conception, la réalisation et l'exploitation ou la maintenance d'un équipement**. La procédure est passée par le levier de la **procédure de commande publique**. Le recours au MGP pour les différentes **actions permettrait d'avoir une cohérence d'action avec une optimisation des usages et des performances**.



AVANTAGES

- **Un partenaire constructeur exploitant** qui connaît l'équipement parfaitement et se retrouve en capacité de **maximiser ses performances**;
- Un possible **étalement de la charge d'investissement** avec paiement à l'avancement;
- **Diminution des charges d'exploitation**;
- **Transfert du risque** d'investissement et du risque industrie;

INCONVENIENTS

- **Définition précise** du **besoin** et du **cahier des charges** ;
- **Procédure encadrée** et stricte
- **Engagement de long terme** avec le partenaire de construction / exploitation
- Nécessité d'avoir un **suivi du contrat**
- **Paieement d'une marge** au partenaire sur les composantes
 - Conception
 - Construction
 - Exploitation

Opportunités de financement/montage par catégorie d'action

Focus - Action 4



Investissement biomasse

La réalisation d'un investissement dans une installation de production EnR de type biomasse par exemple, par le levier **d'une structure juridique ad hoc (type SEM / SPL)** serait une façon d'optimiser les éléments de prix de l'énergie / **Effet levier et rationalisation des fonds propres / optimisation des risques.**



AVANTAGES

- Opportunité **d'agréger des partenaires** et **minimiser les apports en fonds propres** de l'école X
 - **Diminution des risques** liés au **portage de l'investissement**;
 - **Opportunité pour la définition d'un prix** permettant d'assurer :
 - Une **minoration du coût de l'énergie** (fourniture auprès de l'école);
- et**
- Une **rentabilité / un équilibre économique** pour la structure de portage
 - **Externalisation du financement** – diminution du coût global pour l'école

INCONVENIENTS

- **Nécessité de création d'une société destinée au portage** de l'équipement et d'y agréger des partenaires;
- **Mise en place et cadre légal** pouvant être complexes

Opportunités de financement/montage par catégorie d'action

Focus - Action 4



Investissement - création de la structure de portage

Définition de l'objet de l'investissement

Etude de prefiguration sur l'objet de l'investissement – modèle économique



Vision stratégique de l'intervention du porteur de projet

Quelle gouvernance pour le projet? Dans quel but?



Définition d'un modèle juridique

Articuler l'opportunité de création de valeur du projets et les opportunités de gouvernance



Rédaction d'un document investisseur et réalisation de tours de table

Mobiliser des fonds publics - privés



Rédaction des statuts

Sceller les modalités d'intervention des parties prenantes



05

Démonstrateurs et intégration des initiatives académiques

Pour aller plus loin, en matière d'efficacité énergétique et d'innovation

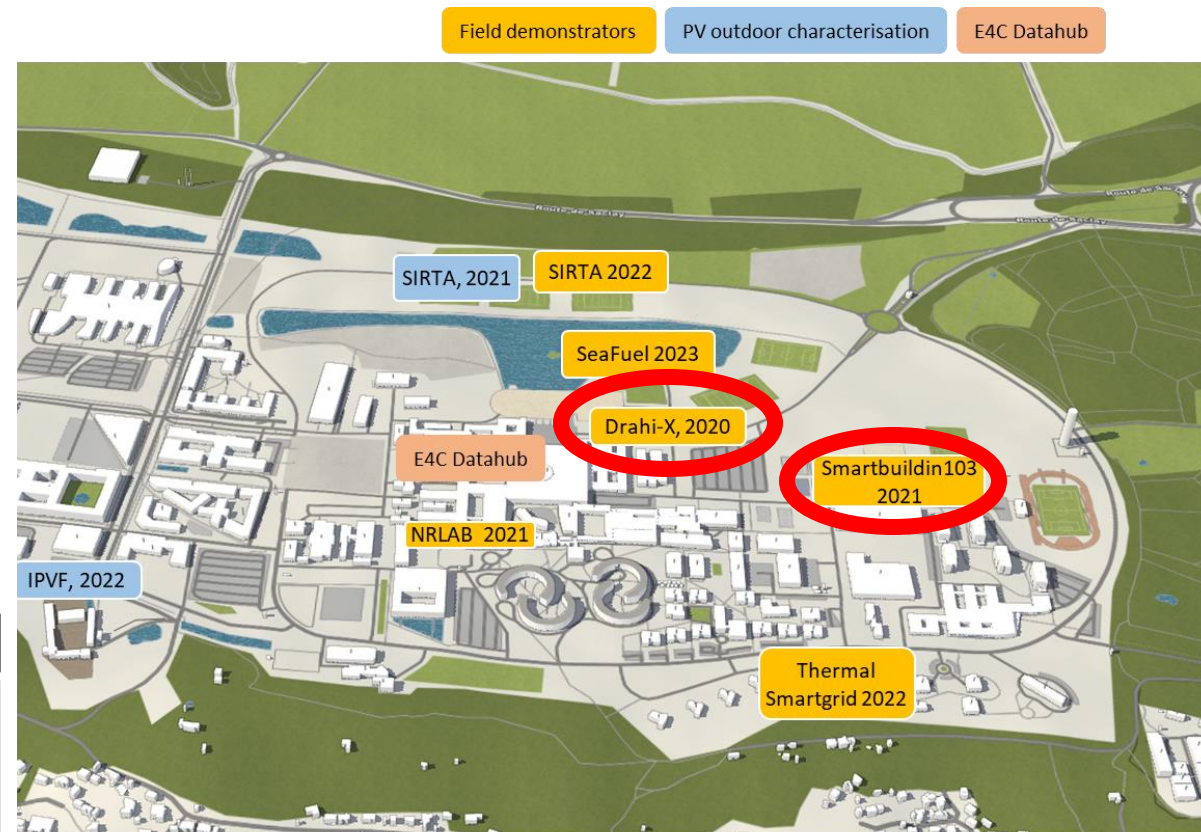
Partenariats d'innovation et démonstrateurs

Intégration des démonstrateurs à la démarche SDE

- Les **démonstrateurs sur le campus peuvent aider** :
 - Au suivi des mesures d'efficacité énergétique
 - A la production et au suivi de la production renouvelable
 - Au suivi de mesures moins chiffrables (comportementales, sociales...)
 - Aux développements technologiques nécessaires pour l'atteinte des objectifs du Plan Climat et du SDE de l'école (ex. puits carbone)
- Le **SDE** peut également **alimenter les initiatives de recherche** avec, par exemple, des données et des opportunités de financement

Bâtiments démonstrateurs identifiés comme les plus à même de contribuer à la démarche SDE

Drahi-X	Smartbuilding 103
Système de PAC, CTA	Projet PV : 200 kWc sur toiture, stockage, bornes électriques, vannes thermostatiques, application de suivi des consommations
17 kWc de PV sur toiture + stockage	
1 borne V2G	
Nombreux capteurs de mesure électrique avec plus d'un an de data	Aspect consommateur et sociétal
Projets en cours sur la gestion CVC	



Initiatives académiques

Possibles voies d'intégration des initiatives académiques au SDE

- Intégration de l'équipe E4C dans la **gouvernance** du SDE
- Identification continue des **contributions des démonstrateurs** sur le campus à l'atteinte des objectifs du SDE et du **Plan Climat**
 - Projets PV (contribution EnR électrique)
 - Résultats du démonstrateur sur les aspects comportementaux dans le bâtiment 103 (contribution sobriété)
 - Suivi des consommations (contribution à l'évaluation de l'impact des actions)
 - ...
- **Projets de recherche** contribuant à l'atteinte des objectifs du Plan Climat et du SDE de l'école
 - **Puits carbone**, ex. recherche sur le biochar fait par KTH (Suède) et FUB (Allemagne)
 - **Jumeau digital** permettant d'optimiser les usages et les consommations d'énergie au sein du campus (en cours par KTH)
 - ...
- **Partenariats avec d'autres universités ou partenaires locaux (EPAPS)** sur des projets de recherche et d'innovation contribuant aux objectifs climatiques (avec la possibilité d'obtention de financements UE, ex. Horizon Europe)
- **Intégration des élèves** dans la démarche SDE, par exemple
 - A travers un appel à **projets d'innovation**, comme fait à Berlin (FUB) où les projets sont proposés par les élèves, les agents et/ou les chercheurs, avec un budget de 5k€/projet retenu
 - En leur donnant **certaines tâches**, ex. suivi et analyse des consommations, amélioration de certaines hypothèses de travail (ex. facteurs d'émission des achats de biens et de services)...

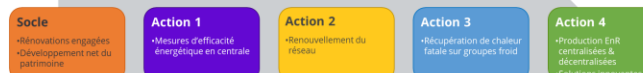


06

Feuille de route

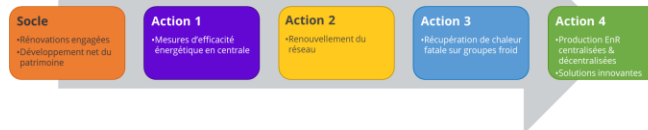
Plan d'action à long-terme et calendrier de déploiement

Feuille de route (1/3)



	Tâches	Pilote	Appui potentiel	Sous-tâches	Déploiement	Conditions de réussite
Socle Rénovations engagées Dév. net du patrimoine	Validation du programme immobilier : rénovation et plan de déconstruction-reconstruction du campus	EP	AMO stratégie DD	Désignation d'un ou plusieurs MOE	Dès 2022	Validations budgétaires Validation des objectifs de performance énergétique Mobilisation de financements externes (CEE, ELENA)
	Réalisation d'études détaillées pour l'intégration des mesures d'efficacité énergétique dans les bâtiments et le calcul de performance énergétique associé	EP	MOE	Etudes de conception par bâtiment : audits, STD et élaboration des cahiers des charge constructeurs	Dès 2022	Vérification de la cohérence des résultats avec les indicateurs DD du campus
Action 1 Mesures d'efficacité énergétique en centrale	Intégration des mesures d'efficacité énergétique dans un marché de performances	EP	AMO pour le cahier des charges	Définition du périmètre, des objectifs de gains, des travaux à engager (descriptifs et montants) et de clauses d'intéressement/pénalités et de la durée optimum du marché	2021 - 2022	
	Mise en place d'une organisation dédiée au suivi du marché de performance	EP	AMO pour le suivi	Définition d'une organisation dédiée au suivi de la performance du campus /du marché	2021 - 2022	Evolution de l'organisation (réorganisation-recrutement et/ou marché de prestation) Mobilisation de financements externes (FNCCR/ELENA)
Action 2 Renouvellement du réseau	Mise en œuvre d'un audit du réseau (localisation, caractérisation, état, ...)	EP	AMO pour l'audit	Revue documentaire, plan de visite et outils de caractérisation (caméra infrarouges, visites de chambres à vannes, galeries techniques, ...)	2022	Etablissement d'un audit exhaustif complet
	Etablissement d'un plan de renouvellement du réseau par tronçon	EP	AMO pour l'audit	Hiérarchisation et priorisation des tronçons à remplacer	2022	Plan quinquennal à établir pour les tronçons à fort impact énergétique
	Intégration d'un programme de renouvellement et phasage dans un programme de travaux	EP	AMO pour l'audit	Evaluation de l'intégration de l'action au marché de performance	2022	Intégration des contraintes d'exploitation du site pour la programmation des travaux
	Suivi du plan de renouvellement	EP	AMO pour le suivi	Définition d'une organisation dédiée au suivi du plan de renouvellement du réseau	Dès 2022	Evolution de l'organisation (réorganisation-recrutement et/ou marché de prestation) Mobilisation de financements externes (FNCCR/ELENA)

Feuille de route (2/3)



	Tâches	Pilote	Appui potentiel	Sous-tâches	Déploiement	Conditions de réussite
Action 3 Récupération de chaleur fatale sur groupes froid	Planification des travaux de mise en œuvre	EP			2023	Validations budgétaires Mobilisation de financements externes (ADEME, CEE)
	Réalisation d'une étude détaillée de faisabilité technique (implantation, travaux d'adaptation, ...)	EP	MOE/ Exploitant MGP	Etude de conception, programme de travaux, chiffrage des coûts et évaluation des gains d'énergie	2023 - 2025	Capitalisation sur mesures d'efficacité énergétiques bâtiments et centrale
Action 4 Production EnR centralisées & décentralisées Solutions innovantes	Réalisation d'études détaillées par zone	EP	AMO stratégie énergétique	Etudes de faisabilité, schémas de principe de fonctionnement, chiffrage des coûts et programme de travaux associés	2025 - 2027	Capitalisation sur mesures d'efficacité énergétiques bâtiments et centrale Capitalisation sur impact récupération de chaleur via TFP
	Identification des mutualisations possibles	EP	AMO stratégie énergétique	Point d'échange et planification avec acteurs proches (EPA/IP Paris)	2025 - 2027	Partage des conclusions du SDE dès 2021 avec acteurs proches
	Identification des programmes de recherches et partenariats d'innovation possibles	EP	AMO stratégie énergétique	Identification des appels à projets existants et analyse des bénéfices risques pour l'EP	2026 - 2027	Capitalisation sur mesures d'efficacité énergétiques bâtiments et centrale Capitalisation sur impact récupération de chaleur via TFP Mobilisation de financements externes et appels à projet
	Validation des solutions techniques et des portages contractuels associés	EP	AMO stratégie énergétique	Présentation des schémas de partenariats (mutualisations, innovation, ...) Préparation et présentation en CA	2027	Accords avec les différentes Parties Cadrement des périmètres et conventions partenariales
	Intégration des solutions techniques dans un (plusieurs) marché(s) dédié(s)	EP	AMO pour le(s) cahier(s) des charges	Définition du périmètre, des objectifs de gains, des travaux à engager (descriptifs et montants) et de clauses d'intéressements/pénalités et de la durée optimum du marché	2028	Validations budgétaires Validation des objectifs de performance énergétique Mobilisation de financements externes

Feuille de route (3/3)



	Tâches	Pilote	Appui potentiel	Sous-tâches	Déploiement	Conditions de réussite
Action 4 Production EnR centralisées & décentralisée Solutions innovantes	Lancement et suivi des travaux suivant schémas contractuels arrêtés	EP	AMO pour le suivi	Définition d'une organisation dédiée au suivi des travaux	2029 - 2030	Evolution de l'organisation (réorganisation-recrutement et/ou marché de prestation) Mobilisation de financements externes (FNCCR/ELENA)
	Mise en place d'une organisation dédiée au suivi des marchés/contrats	EP	AMO pour le suivi	Définition d'une organisation dédiée au suivi de la performance du campus /du marché	Dès 2030	Evolution de l'organisation (réorganisation-recrutement et/ou marché de prestation) Mobilisation de financements externes (FNCCR/ELENA)
Initiatives académiques	Capitalisation en continue des résultats liés aux actions mises en places	EP	AMO stratégie énergétique	Mise en place d'un programme de suivi associant divers acteurs et partenaires	Dès 2022	Intégration des acteurs et partenaires locaux et définition d'une démarche conjointe

[illegible]

TILIA, CREATEUR DE VALEURS POUR TOUS DANS LES TERRITOIRES

MERCI BEAUCOUP!





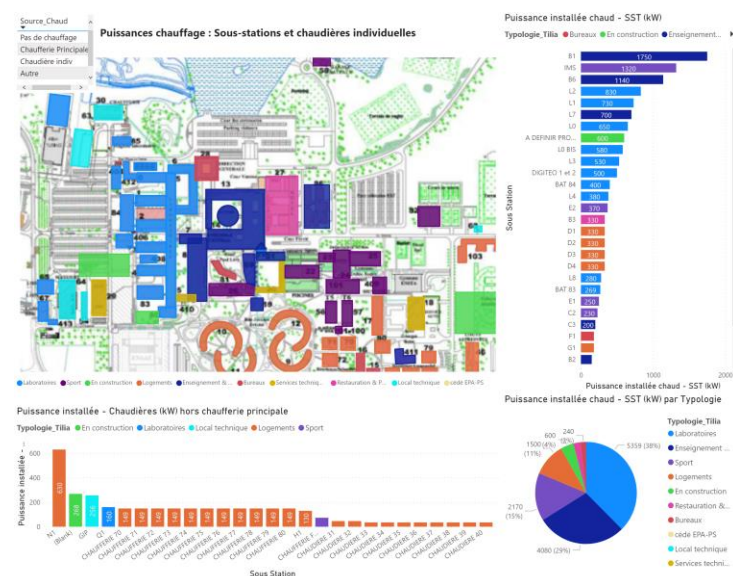
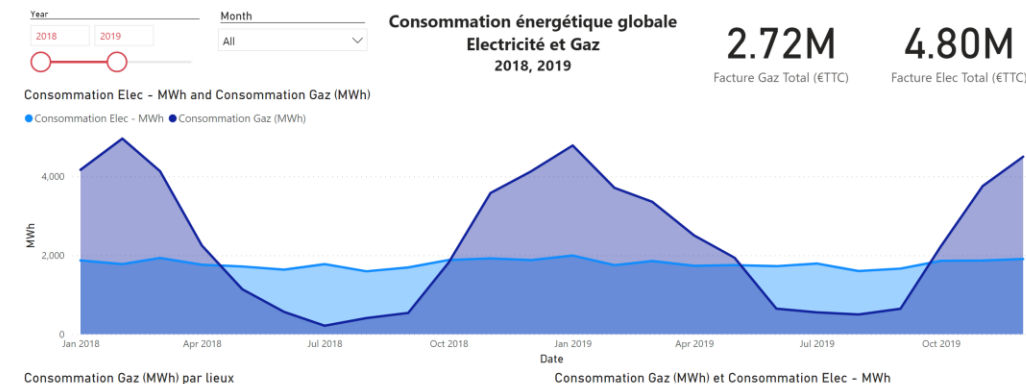
1. Base de données du diagnostic et modèle PBI
2. Outil APE des bâtiments
3. Guide utilisateur de l'outil APE bâtiments
4. Scénario Opérationnel bâtiminaire
5. Estimation des pertes réseau
6. Note de calcul - Puissances réseau
7. Monotone froid
8. Monotone chaud
9. Tri horaire et puissances EnR
10. Outil Scénarisation énergie
11. à 15. Evolution des consommations et émissions à horizon 2050

ANNEXE 1

Base de données du diagnostic et modèle PBI

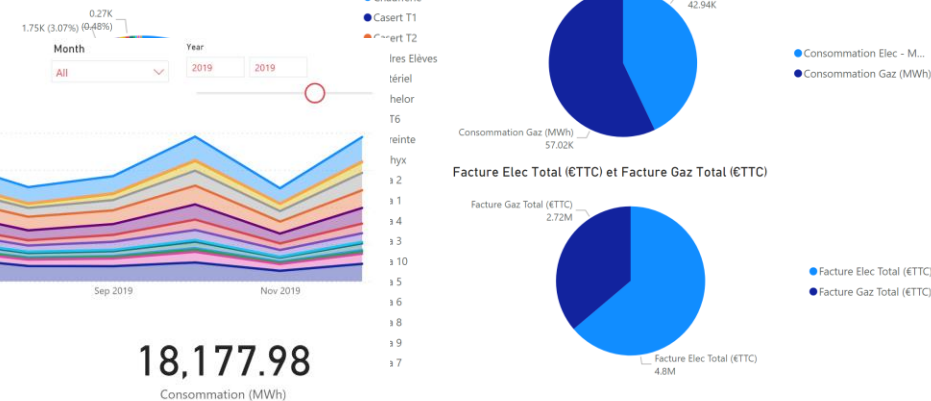
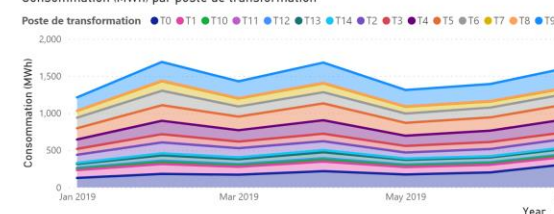
➤ Un fichier Excel et un fichier PBI

Le fichier *BDD_Diagnostic_SDEX* rassemble l'ensemble des éléments collectés concernant le patrimoine de l'Ecole polytechnique et son réseau de chaleur et de froid. Il permet d'alimenter un modèle PBI développé en phase de Diagnostic (T1) afin de visualiser au mieux ces données.



Relevés manuels de consommation des compteurs principaux : 2019

Consommation (MWh) par poste de transformation



Poste de transformation	Catégorie	Consommation (MWh)
T0	Production de Chaud	87.59
T0	Production de Froid	2,352.53
T1	TR1	450.06
T1	TR2	883.24
T10	TR/recherche/stockage	281.73
T11	TR/Logements	48.94
T12	TR/Logements	141.66
T13	TR1/SG/Recherche	653.90
T13	TR2/Process/Recherche	156.49
Total		18,177.98

ANNEXE 2

Outil de définition des APE des bâtiments et guide utilisateur

➤ Un fichier de calcul Excel

Amoës
L'Énergie Positive

Ecole Polytechnique
Conception du schéma directeur énergie

Outil de sélection des Actions de Performance Énergétique [APE] - Scénarii CO2

Version / Date	Version 11.0 du 16/11/2021
Auteurs	Hugo Varela – hugo.varela@amoës.com Charles Gerard – charles.gerard@amoës.com
Contact	Amoës Asnières 38-42 rue Gallieni 92 600 Asnières-sur-Seine Tél : 01 41 32 22 11

Amoës
Outil de sélection des Actions de Performance Énergétique [APE]
Scénarii CO2

Groupe d'APE	Typologie	Echanc	Coût (K€ HT)	Economie chaleur (MWh/an)	Economie électricité (MWh/an)	Economie d'énergie (MWh/an)	Economie carbone (TCO2e/an)	Coût / économies carbone (EUR HT/kCO2e)
Équipements de chauffage / sous-stations	bat 32-Piscines	2025	477	140	2	142	32	15
Équipements de ventilation	bat 32-Piscines	2025	142	215	25	240	50	15
Équipements d'ECS / récupération sur EU	bat 32-Piscines	2025	35	18	0	18	4	23
Remplacement de l'éclairage	bat 32-Piscines	2025	37	0	18	18	1	32
Réhabilitation des carrelages	bat 32-Piscines	2025	4145	931	0	931	211	22
Suivi / régulation des consommations de chaleur	bat 32-Piscines	2025	278	14	42	55	6	48
Suivi / régulation des consommations de chaleur	bat 37-Hôtel / restauration	2025	654	13	163	176	13	64
Suivi / régulation des consommations de chaleur	Exemple des anciens casiers	2025	477	28	36	64	9	55
Suivi / régulation des consommations de chaleur	Exemple des anciens laboratoires	2025	3559	52	503	555	44	86
Suivi / régulation des consommations de chaleur	Exemple des bâtiments cadres et dév. maris	2025	261	6	33	39	3	76
Suivi / régulation des consommations de chaleur	Exemple des bureaux et salles d'enseignement	2025	1237	29	204	232	26	48
Suivi / régulation des consommations de chaleur	Exemple des complexes sportifs	2025						
Suivi / régulation des consommations de chaleur	Exemple des laboratoires récents	2025						
Suivi / régulation des consommations de chaleur	Exemple des résidences Schœffer et Lemonnier	2025						
Suivi / régulation des consommations de chaleur	Exemple des villas cadres	2025						
Équipements de chauffage / sous-stations	bat 37-Hôtel /	2030						
Équipements de chauffage / sous-stations	Exemple des anciens laboratoires	2030						
Équipements de chauffage / sous-stations	Exemple des anciens bat 37-Hôtel /	2030						
Équipements de ventilation	Exemple des anciens laboratoires	2030						
Équipements d'ECS / récupération sur EU	bat 37-Hôtel /	2030						
Équipements d'ECS / récupération sur EU	Exemple des anciens laboratoires	2030						
Équipements d'ECS / récupération sur EU	Exemple des villas cadres	2030						
Remplacement de l'éclairage	Exemple des anciens bat 37-Hôtel /	2030						

	Emissions du campus (TCO2/an)	Pourcent age d'écart	Investisse ment cumulé (K€)	Coût (K€ HT)	Economie chaleur (MWh/an)	Economie électricité (MWh/an)	Economie d'énergie (MWh/an)	Economie carbone (TCO2e/an)	Coût / économies carbone (EUR HT/kCO2e)
TOT	2414			#####	13 183	2 814	16 003	3 174	34
2020	5588	100%	-	-	-	-	-	-	-
2025	5164	92%	14577	14577	1486	1354	2840	424	34
2030	3891	70%	48483	31906	5363	862	6225	1272	25
2035	3036	54%	61456	34973	3640	454	4094	855	41
2040	2517	45%	101266	19810	2260	102	2362	519	36
2045	2414	43%	106959	5694	440	43	483	103	55
2050	2414	43%	106959	-	-	-	-	-	#DIV/0!

Scénario médian

Investissement cumulé (K€ HT) | Emissions du campus (TCO2/an)

ANNEXE 3

Outil de définition des APE des bâtiments et guide utilisateur

➤ Un fichier PDF

Sommaire

1 Présentation de la Base de Données [BDD]	3
1.1 Audits énergétiques et analyse des données	3
1.2 Description des Actions de Performance	3
2 Présentation des scénarii	4
2.1 Scénario progressif	5
2.2 Scénario médian	5
2.3 Scénario rapide	6
3 Création d'un scénario libre	6
3.1 Ajouter une APE	6
3.2 Bouton « Copier la ligne »	7
3.3 Bouton « Supprimer la ligne »	7
3.4 Analyse du scénario libre	7
3.5 Garde-fou	8



Campus Ecole Polytechnique Palaiseau Guide utilisateur de l'outil - définition des schémas directeurs énergie



	Coûts	Economies énergie	Economies Carbone	Ratio Cout/CO2
Groupes de typologie	k€	MWh/an	TCO2eq/an	€/kg CO2eq
Piscine	6 434	1 404	305	21.1
Hôtel/Restaurant	5 508	1 262	235	23.4
Anciens laboratoires	28 289	5 398	1029	27.5
Complexes sportifs	10 375	1 521	312	33.3
Schaeffer Lemonier	9 751	1 177	253	38.5
Anciens Caserts	11 046	1 303	282	39.2
Villa Cadre	2 625	309	67	39.2
Cadres et élèves mariés	4 912	538	109	45.1
Bureaux et enseignements	21 884	2 531	473	46.3
Labo récents	6 102	562	109	56.0

ANNEXE 4

Outil de définition des APE des bâtiments : Scénario Opérationnel

➤ L'outil APE des bâtiments prérempli pour le scénario opérationnel du campus



Ecole Polytechnique
Conception du schéma directeur énergie

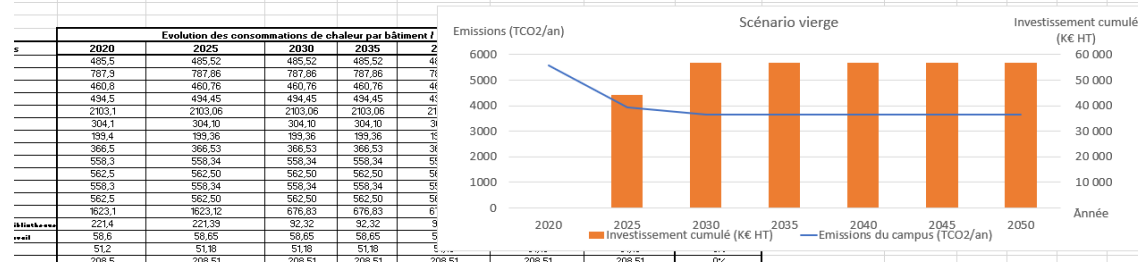
Outil de sélection des Actions de Performance Énergétique [APE] - Scénarii CO2



Version / Date	Version 11.0 du 16/11/2021
Auteurs	Hugo Varela – hugo.varela@amoès.com Charles Gerard – charles.gerard@amoès.com
Contact	Amoès Asnières 38-42 rue Gallieni 92 600 Asnières-sur-Seine Tél : 01 41 32 22 11

Outil de sélection des Actions de Performance Énergétique [APE] Scénario Opérationnel										
Bâtiment	Catégorie	Description	Échéance	Coût (K€ HT)	Economie chaleur (kWh/an)	Economie électricité (kWh/an)	Economie d'énergie (kWh/an)	Economie carbone (TCO2eq/an)	Coût / économies carbone (EUR HT/kgCO2eq)	Garde fou : OK ou NOK
bat 13-Ensemble central	Ventilation	Comptage des consommations électriques des CTA et	2030	37	0	9361	9 361	1	58	
bat 13-Ensemble central	Sous-station de chaleur	Mise en place d'un sous-comptage de chaleur par bâtiment	2030	39	8090	809	8 899	2	21	
bat 13-Ensemble central	Sous-station de chaleur	Rénovation de la régulation sous-station - armoire de commande	2030	57	4382	876	5 259	1	54	
bat 13-Ensemble central	Eau Chaude Sanitaire	Programme de régulation de la production d'ECS par cycles longs	2030	22	1944	0	1 944	0	51	
bat 13-Ensemble central	Eclairage	Comptage électrique des consommations	2030	128	0	34241	34 241	2	53	
bat 13-Ensemble central	Eclairage	Pose de détecteurs et de sondes crépusculaires dans les circulations	2030	317	0	58636	58 636	4	84	
bat 13-Ensemble central	Eclairage	Programmation horaire de l'éclairage du bâtiment	2030	24	0	48915	48 915	3	8	
bat 13-Ensemble central	Rénovation toiture	laine minérale - 260 mm	2030	922	59518	0	59 518	14	68	

	Emissions du campus (TCO2/an)	Investissement cumulé (K€ HT)	Coût (K€ HT)	Economie chaleur (MWh/an)	Economie électricité (MWh/an)	Economie d'énergie (MWh/an)	Economie carbone (TCO2eq/an)	Coût / économies carbone (EUR HT/kgCO2eq)
TOTAL	3669	-	56 891	7 880	2 040	9 921	1 919	30
2020	5588	-	-	-	-	-	-	-
2025	3936	44395	44 395	6 805	1 683	8 488	1 652	27
2030	3669	56891	12 496	1 075	357	1 432	267	47
2035	3669	56891	-	-	-	-	-	#DIV/0!
2040	3669	56891	-	-	-	-	-	#DIV/0!
2045	3669	56891	-	-	-	-	-	#DIV/0!
2050	3669	56891	-	-	-	-	-	#DIV/0!



ANNEXE 5

Estimation des pertes réseau

➤ Un fichier de calcul Excel

Le fichier *Estimations pertes réseau* permet d'estimer les pertes des réseaux chaud et froid à partir d'un calcul prenant en compte :

- Les linaires totaux des réseaux
- La répartition des mètres linéaires par type de DN (source : devis effectué par Gesten)
- Une hypothèse de canalisation de type acier pré-isolé
- Les puissances moyennes chaud et froid appelées sur l'année (source : monotones Tilia)
- Les températures moyennes sur le réseau estimées à 85 °C pour le chaud et 7 °C pour le froid (source : Gesten)
- Un coefficient de dégradation de l'isolant estimé à 60% sur 90% du réseau (estimation suite à l'audit des installations)

Ce fichier nous permet de **consolider les valeurs apportées par les fichiers de relevés de Gesten et d'estimer le gain énergétique après rénovation des réseaux.**

						Pertes totales chaud		10,9%	
						Pertes totales froid		-1,17%	
Isolant (W/m.K)		Gaine (W/m.K)		temp chaud		temp froid			
0,027		0,43		85		7			
								temp sol	
								13	
Risolant		Rgaine		Résistance linéique canalisation acier pré-isolée (m.K/v)		1R			
						Réseau chaud		réseau froid	
								perdes chaud (k/v)	
								perdes froid	
41	3,286213454	0,012547808	3,30	0,303121	1062			23,2	
44	3,287444021	0,0102346	3,23	0,309677	1195			25,3	
45	2,683667919	0,0102346	2,69	0,371183	1505			40,2	
44	2,337697845	0,0069314	2,35	0,426105	1129			34,6	
46	1,900358135	0,008017522	1,91	0,523973	748			28,2	
42	1,629352777	0,007477583	1,64	0,544363	365			14,3	
45	1,747764335	0,00634627	1,75	0,570057	538			22,0	
45	1,452972133	0,005969332	1,46	0,685391	502			24,8	
45	1,642228333	0,006120421	1,17	0,654396	727			44,7	
45	1,059677194	0,005830456	1,07	0,338533	260			17,6	
45	1,140919377	0,004843211	1,15	0,872738	0	2500		0,0	
45	0,962491065	0,004634334	0,97	1,033934	0			0,0	
45	0,694287624	0,004295535	0,70	1,431372	712			73,4	
								348,3	
								-13,1	
								Pertes estimées	
								3188	
								10,9%	
								Pertes estimées	
								120 k/s	
								-1,17%	
				Réseau chaud		réseau froid		perdes chaud (k/v)	
								perdes froid	

2021	2022	2023	2024	2025	202
0	0	0	0	781	78:
10,0%	10,0%	10,0%	10,0%	19,0%	28,0
23%	23%	23%	23%	22%	219
150	150	150	150	150	150
16,0%	22,0%	28,0%	34,0%	40,0%	46,0
Pertes froid	3%	2%	2%	2%	2%

ANNEXE 6

Note de calcul des puissances chaud et froid : modélisation des monotones

Un fichier Word

Note technique – Approvisionnement énergétique de l'école Polytechnique

Afin d'intégrer la **saisonnalité été/hiver** et ses différents modes de fonctionnement, nous avons fait l'hypothèse des périodes suivantes :

- Été : du 01/05 au 01/10
- Hiver : du 01/10 au 01/05

2 Chaufferie principale (bât 30)

2.1 Etat des lieux

La chaufferie principale de l'école Polytechnique est constituée des 3 chaudières suivantes :

Chaudière	Puissance nominale	Date d'installation
Chaudière Hiver n°1: TRANSTUB P6000 pression de service 3 Bars	7 000 kW	Installée en 1973
Chaudière Hiver n°2: BUDERUS type LOGANO S825L-6500 pression de service 3 bars	6 500 kW	Installée en 2009
Chaudière été: BUDERUS type LOGANO S825L-2500 pression de service 3 Bars	2 500 kW	Installée en 2009

La régulation des chaudières s'effectue manuellement selon le principe suivant décrit par les équipes GESTEN et renseigné dans le CCTP :

- En été : seule la chaudière été (2,5 MW chaud) est en fonctionnement et permet d'alimenter l'eau chaude sanitaire semi-instantanée et instantanée ;
- En hiver : les chaudières 1 et 2 (13.5 MW chaud) sont en fonctionnement et alimentent l'ensemble du périmètre

D'après le CCTP et nos échanges avec l'opérateur du réseau, la température de départ de la chaufferie est autour de 90°C et le retour supposé à 70°C.

Temp. extérieures	-7 °C	0 °C	5 °C	12 °C	18 °C
Pchaudières	90%	90%	90%	90%	90%
Précup					
Tchaud départ	95	93	90	90	80
Tchaud retour	70	70	70	70	65

Figure 2 : Points de fonctionnement de la chaufferie (source : GESTEN)

Note technique – Approvisionnement énergétique de l'école Polytechnique



Note technique – Approvisionnement énergétique de l'école Polytechnique

À VOIR RELIÉS DE CONSERVATION :

Date	Quantité (m³)	Temps (h)
01/01	12000	12000
02/01	12000	12000
03/01	12000	12000
04/01	12000	12000
05/01	12000	12000
06/01	12000	12000
07/01	12000	12000
08/01	12000	12000
09/01	12000	12000
10/01	12000	12000
11/01	12000	12000
12/01	12000	12000
13/01	12000	12000
14/01	12000	12000
15/01	12000	12000
16/01	12000	12000
17/01	12000	12000
18/01	12000	12000
19/01	12000	12000
20/01	12000	12000
21/01	12000	12000
22/01	12000	12000
23/01	12000	12000
24/01	12000	12000
25/01	12000	12000
26/01	12000	12000
27/01	12000	12000
28/01	12000	12000
29/01	12000	12000
30/01	12000	12000
31/01	12000	12000
TOTAL	360000	360000

Deux récupérateurs de chaleur sont **pas fonctionnels** trop élevée pour atténuer la demande. « les régimes de température potentiels travaux sur »

De récents travaux ont

Une « GTB » est en cours de 2021. Ces données dev

2.2 Présentation d

Pour la chaufferie prin

- Des relevés r
- Des factures d

Les relevés manuels d

Les factures de gaz é

de gaz par jour (kW

consommation équiva

Note technique – Approvisionnement énergétique de l'école Polytechnique

À VOIR RELIÉS DE CONSERVATION :

Date	Quantité (m³)	Temps (h)
01/01	12000	12000
02/01	12000	12000
03/01	12000	12000
04/01	12000	12000
05/01	12000	12000
06/01	12000	12000
07/01	12000	12000
08/01	12000	12000
09/01	12000	12000
10/01	12000	12000
11/01	12000	12000
12/01	12000	12000
13/01	12000	12000
14/01	12000	12000
15/01	12000	12000
16/01	12000	12000
17/01	12000	12000
18/01	12000	12000
19/01	12000	12000
20/01	12000	12000
21/01	12000	12000
22/01	12000	12000
23/01	12000	12000
24/01	12000	12000
25/01	12000	12000
26/01	12000	12000
27/01	12000	12000
28/01	12000	12000
29/01	12000	12000
30/01	12000	12000
31/01	12000	12000
TOTAL	360000	360000

Figure 4 : Extrait de la facture Gaz de Bordeaux pour janvier 2019

En croisant les relevés de compteur de GESTEN et les factures de gaz sur l'année 2019, nous sommes remontés à un premier rendement pour la chaufferie :

- Les consommations de gaz s'élèvent à : $E_{\text{gaz, factures}} = 23\,372 \text{ MWh PCS}$
- L'énergie au départ de la chaufferie (compteur calorifique) s'élève à : $E_{\text{départ chaufferie}} = 18\,887 \text{ MWh}$

Nous déduisons ainsi le rendement PCS moyen $\eta_{\text{PCS chaufferie}} = \frac{E_{\text{départ chaufferie}}}{E_{\text{gaz, factures}}} = 81\%$ de la chaufferie principale. Ce rendement ne différencie pas les trois chaudières entre elles mais permet une première approximation du rendement de la chaufferie.

2.3 Construction de courbes de puissance chaud

Face au manque de données précises (par exemple les puissances au pas horaire pour chaque chaudière) sur la performance et la gestion de chacune des chaudières, nous avons reconstruit une courbe de puissance chaud théorique à partir des factures de gaz pour 2019 et du fonctionnement décrit par les équipes de GESTEN.

Notre méthodologie fut la suivante :

A. Estimation de la puissance au pas horaire

- Hypothèse d'une puissance dédiée à la production d'ECS constante sur toute l'année
- Détermination de l'énergie consacrée à la production d'ECS par jour, E_{ECS}^j , comme étant l'énergie moyenne journalière du mois de juillet 2019

Note technique – Approvisionnement énergétique de l'école Polytechnique

- Détermination de l'énergie consacrée au chauffage par jour hors ECS comme la différence entre l'énergie journalière totale mesurée E_{Total}^j et l'énergie consacrée à l'ECS : $E_{\text{chauf}}^j = E_{\text{Total}}^j - E_{\text{ECS}}^j$
- A partir des températures horaires extérieures T_{ext}^h mesurées à Paris-Montsouris¹ : construction des DJU horaires $DJU^h = T_{\text{ext}}^h - 18$
- Calcul d'un coefficient de proportionnalité journalier α_j liant les DJU^h et E_{chauf}^j , l'énergie produite pour le chauffage par les chaudières
- Détermination de la puissance horaire des chaudières dédiée au chauffage : $P_{\text{chauf}}^h = \alpha_j \cdot DJU^h$
- Détermination de la puissance ECS comme la puissance moyenne corrective qui permet de remonter à l'énergie totale des factures : $P_{\text{ECS}}^h = \frac{(E_{\text{Total}}^j - E_{\text{chauf}}^j)}{8760} = 643 \text{ kW}$
- Calcul de $P_{\text{chaufferie}}^h = P_{\text{chauf}}^h + P_{\text{ECS}}^h$

Nous remontons ensuite à la consommation de gaz à partir du rendement PCS moyen $\eta_{\text{PCS chaufferie}} = 81\%$ de la chaufferie principale explicitée précédemment. Ce rendement nous permet d'estimer la puissance gaz horaire :

$$P_{\text{gaz}}^h = \frac{P_{\text{chaufferie}}^h}{\eta_{\text{PCS chaufferie}}}$$

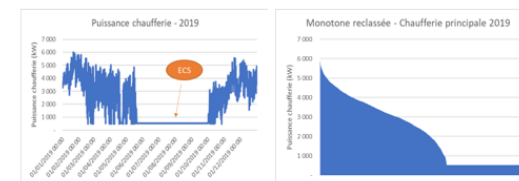


Figure 5 : Production de chaleur et monotone chaud - 2019

B. Cascade de puissance

Les chaudières sont actuellement pilotées manuellement. Des essais de fonctionnement en cascade automatique ont été réalisés par l'opérateur. Suite à un mauvais fonctionnement des vannes motorisées, le fonctionnement en cascade a été abandonné.

¹ <https://prevision-meteo.ch/climat/journalier/paris-montsouris/2019>

ANNEXE 7

Monotone Froid 2019

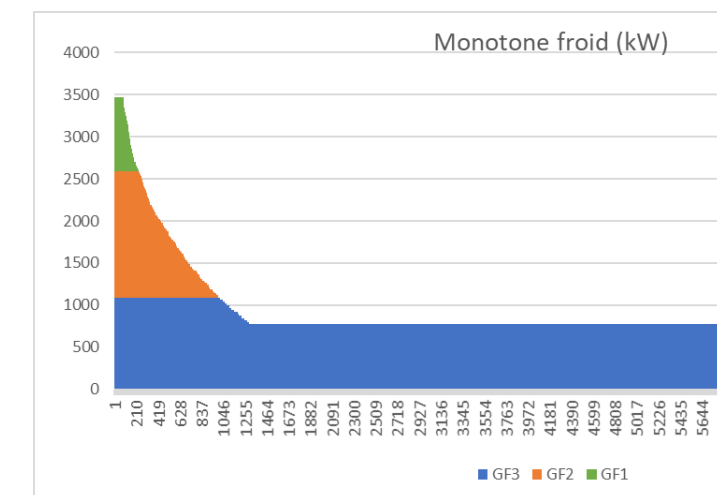
➤ Un fichier de calcul Excel

Le fichier *MonotoneFroid2019* permet le calcul des appels de puissance en froid sur le réseau de l'Ecole polytechnique. Ces calculs s'appuient sur :

- Une analyse de la consommation électrique de la centrale froid (source : relevés électriques du transformateur T0 pour la production de froid)
- Les puissances froid installées et les rendements estimés des Groupes Froid (GF)
- Un calcul d'évolution du rendement des GF en fonction de leur taux de charge (Tilia)
- Un coefficient de dégradation de l'isolant estimé à 60% sur 90% du réseau (estimation suite à l'audit des installations)
- Différentes données issus de la phase de Diagnostic et d'audit (pertes réseaux, fonctionnement en cascade des GF...)
- Une puissance de base appelée pour les process toute l'année
- Une période de non chauffe du 01/05 au 01/10
- Des seuils de température maximum et minimum pour la production de froid hors process. Au-delà du maximum, les groupes froid fonctionnent au maximum de leur puissance

Ce fichier nous permet **d'estimer au pas horaire les appels de puissance froid** en centrale et d'estimer le **gain énergétique suite à la mise en place d'un fonctionnement en cascade**.

	A	B	C	D	E	F	G	H	I
1	DateCourt	Date	Jou	Moi	T_ext	DJUh	Pfroid(h) kW	Pfot(h) kW	Pfot(h)Ajust k
2	01/01/2019	01/01/2019 00:00	1	1	8,6	0	0	737,02	773,89
3	01/01/2019	01/01/2019 01:00	1	1	8,2	0	0	737,02	773,89
4	01/01/2019	01/01/2019 02:00	1	1	7,9	0	0	737,02	773,89
5	01/01/2019	01/01/2019 03:00	1	1	7,7	0	0	737,02	773,89
6	01/01/2019	01/01/2019 04:00	1	1	7,9	0	0	737,02	773,89
7	01/01/2019	01/01/2019 05:00	1	1	8	0	0	737,02	773,89
8	01/01/2019	01/01/2019 06:00	1	1	8,3	0	0	737,02	773,89
9	01/01/2019	01/01/2019 07:00	1	1	8,4	0	0	737,02	773,89
10	01/01/2019	01/01/2019 08:00	1	1	8,5	0	0	737,02	773,89
11	01/01/2019	01/01/2019 09:00	1	1	8,4	0	0	737,02	773,89
12	01/01/2019	01/01/2019 10:00	1	1	8,6	0	0	737,02	773,89
13	01/01/2019	01/01/2019 11:00	1	1	8,6	0	0	737,02	773,89
14	01/01/2019	01/01/2019 12:00	1	1	8,6	0	0	737,02	773,89
15	01/01/2019	01/01/2019 13:00	1	1	8,6	0	0	737,02	773,89
16	01/01/2019	01/01/2019 14:00	1	1	8,8	0	0	737,02	773,89
17	01/01/2019	01/01/2019 15:00	1	1	8,8	0	0	737,02	773,89
18	01/01/2019	01/01/2019 16:00	1	1	8,7	0	0	737,02	773,89
19	01/01/2019	01/01/2019 17:00	1	1	8	0	0	737,02	773,89



ANNEXE 8

Monotone Chaud 2019

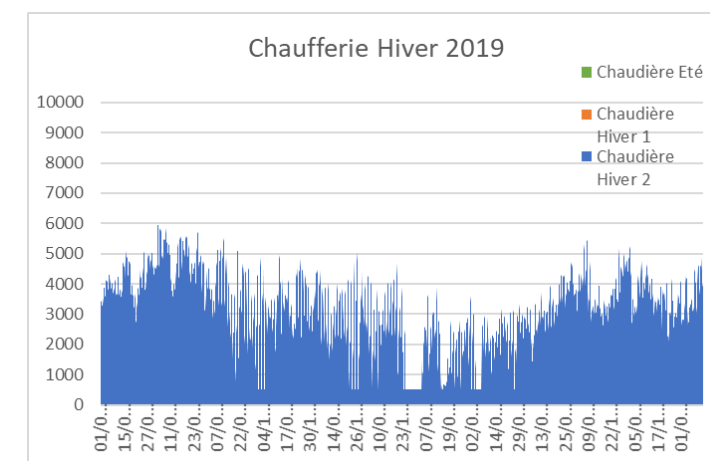
➤ Un fichier de calcul Excel

Le fichier *MonotoneChaud2019* permet le calcul des appels de puissance chaud sur le réseau de l'Ecole polytechnique et la consommation de gaz associée. Ces calculs s'appuient sur :

- Une analyse des consommations de gaz PCS issues des factures de la chaufferie centrale
- Les puissances chaud installées et les rendements estimés des chaudières (source : Gesten)
- Un calcul d'évolution du rendement des chaudières en fonction de leur taux de charge (Tilia)
- Différentes données issues de la phase de Diagnostic et d'audit (pertes réseaux, fonctionnement en cascade des chaudières, rendements des chaudières...)
- Une puissance de base appelée pour la production d'ECS toute l'année
- Une période de non chauffe du 01/05 au 01/10
- Une température de base de 18°C pour le calcul des DJU

Ce fichier nous permet **d'estimer au pas horaire les appels de puissance chaud** en chaufferie centrale et ainsi d'estimer le **gain énergétique suite à la mise en place d'un fonctionnement en cascade, des récupérateurs de fumées**. Cette base nous permet aussi de **calculer les puissances EnR&R à installer** pour couvrir un certain pourcentage de la demande.

	F	G	H	I	J	K	L
er 1	Chaudière Été	Charge été	Charge H2	Charge H1	Gaz Été	Gaz H2	Gaz H1
0	0	0%	52%	0%	0	3935,64706	0
0	0	0%	53%	0%	0	4077,09053	0
0	0	0%	55%	0%	0	4183,17313	0
0	0	0%	56%	0%	0	4199,61082	0
0	0	0%	55%	0%	0	4183,17313	0
0	0	0%	54%	0%	0	4147,81226	0
0	0	0%	53%	0%	0	4041,72966	0
0	0	0%	52%	0%	0	4006,3688	0
0	0	0%	52%	0%	0	3971,00793	0
0	0	0%	52%	0%	0	4006,3688	0
0	0	0%	52%	0%	0	3935,64706	0



EnRR_TriHoraire

Le fichier *EnRR_TriHoraire* permet d'estimer la puissance EnR à installer pour couvrir un certain pourcentage des besoins en chaud du campus. Il s'appuie notamment sur :

- Les puissances appelées qui ont été estimées avec le fichier MonotoneChaud2019
- le tri horaire par température extérieur estimé par Tilia pour l'année 2019

NB : Il est nécessaire de réaliser un calcul de valeur cible avec Excel pour obtenir les résultats de puissance à installer.

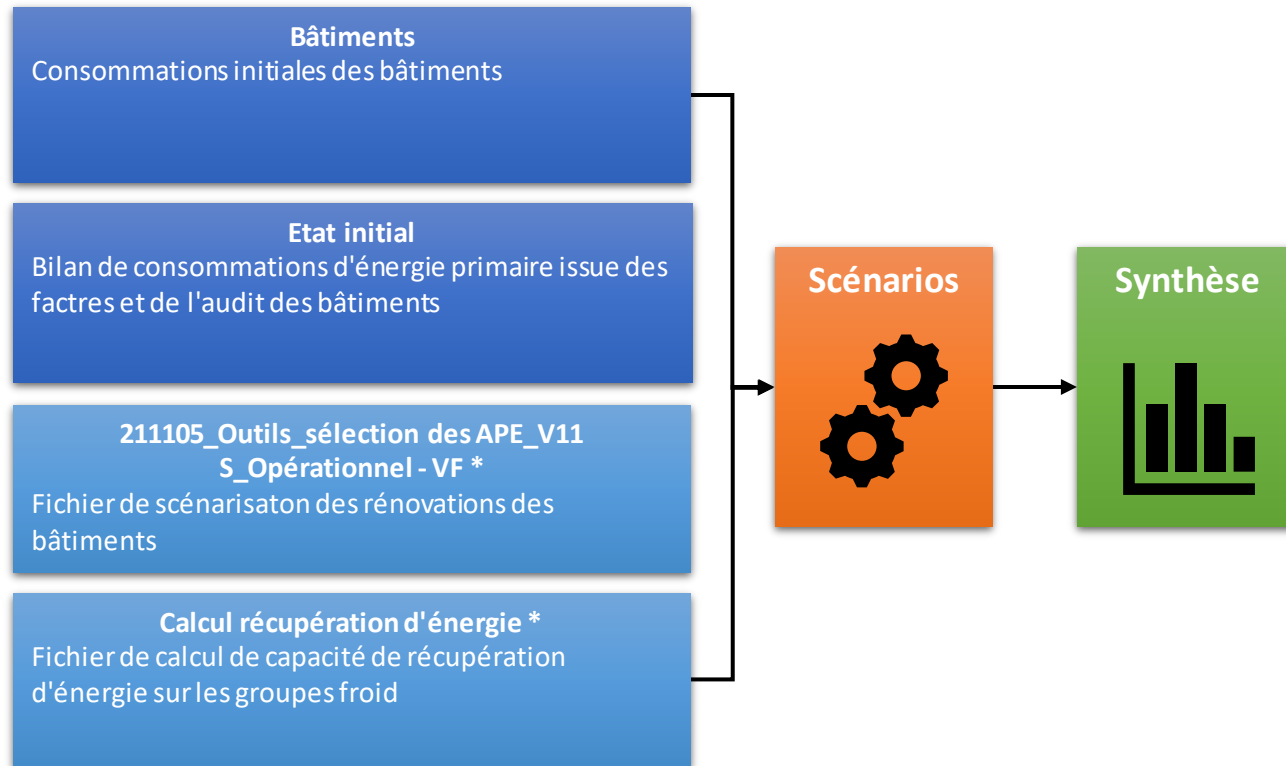
		Couverture	Puissance installée	
-502,24	Solution EnR	80%	3 431	kW
9448,2	Chaudières Gaz	20%	16000	12 843
8 042,72	Autres		5000	-

							-56%					
Températures ext	Heures	Puissance chaufferie max	Puissance chaufferie interpolation corrective	Puissance chaufferie ajustée max	Puissance chaufferie ajustée Théorique	Energie chaufferie (kWh)	Tri Horaire ajusté	EnR P(kW)	Chaudière Gaz P	Autres	Autre solution EnR E(MWh)	
	-7	15	-	6 265	-	6 265	41 550	7	3 431	2 834	-	-
	-6	20	-	6 141	-	6 141	54 303	9	3 431	2 710	-	-
	-5	35	-	6 017	-	6 017	93 109	15	3 431	2 586	-	-
	-4	50	-	5 893	-	5 893	130 268	22	3 431	2 461	-	-
6	-3	75	6 016	5 768	5 768	5 768	191 286	33	3 431	2 337	-	-
6	-2	100	5 961	5 644	5 716	5 716	252 730	44	3 431	2 285	-	-
6	-1	125	5 881	5 520	5 639	5 639	311 653	55	3 431	2 208	-	-
6	0	150	5 851	5 396	5 611	5 611	372 100	66	3 431	2 179	-	-
6	1	200	5 685	5 272	5 451	5 451	482 043	88	3 431	2 020	-	-
6	2	250	5 580	5 148	5 351	5 351	591 483	111	3 431	1 920	-	-
6	3	300	5 455	5 024	5 231	5 231	693 806	133	3 431	1 800	-	-
6	4	350	5 181	4 899	4 968	4 968	768 755	155	3 431	1 537	-	-
6	5	400	5 019	4 775	4 813	4 813	851 228	177	3 431	1 382	-	-
6	6	450	4 862	4 651	4 663	4 663	927 683	199	3 431	1 231	-	-

ANNEXE 10

Outil Scénario Energie et récupération de chaleur fatale

➤ Deux fichiers de calcul Excel



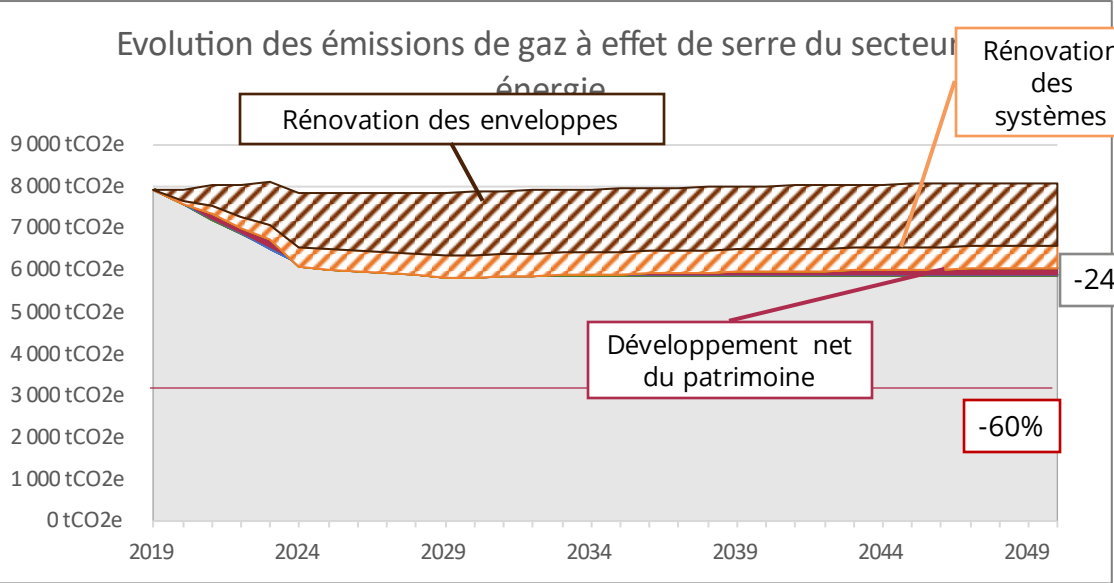
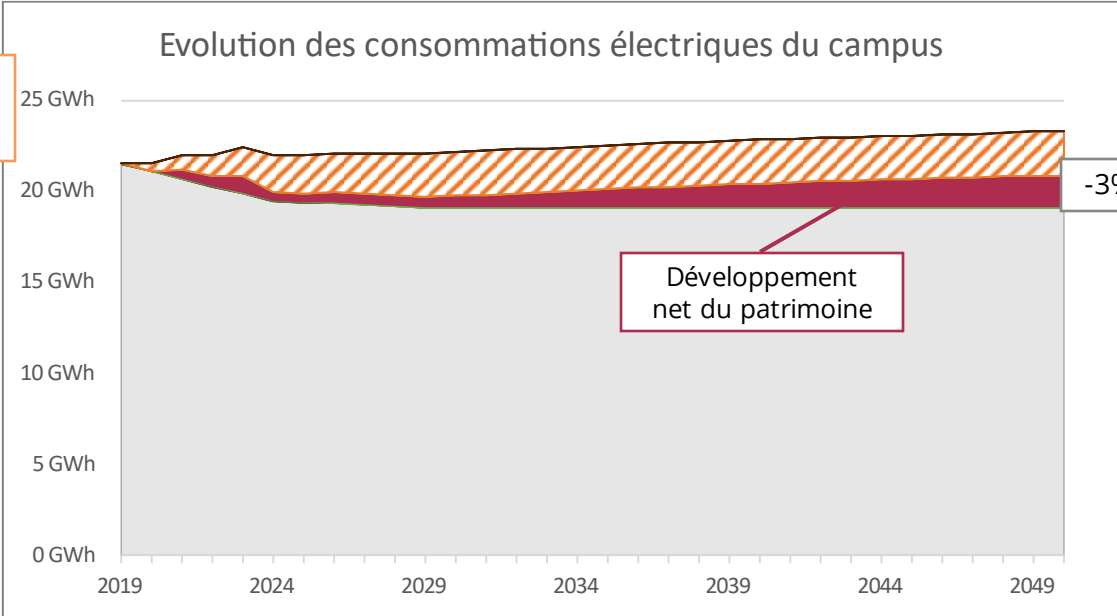
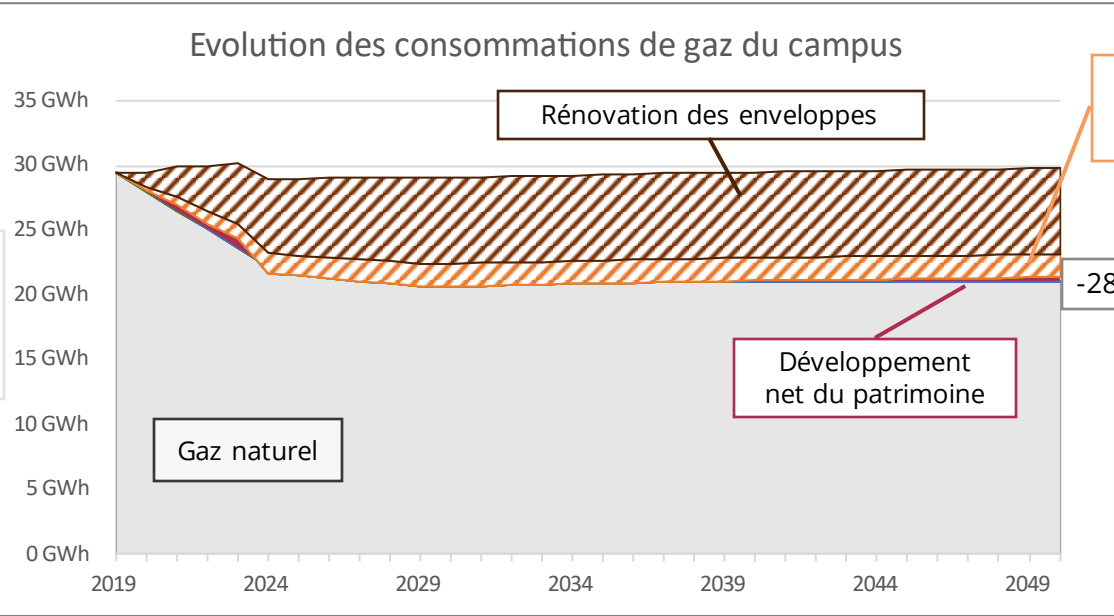
Quatre fichiers et/ou tables de données principales alimentent le tableau de scénarisation. La synthèse de la scénarisation est compilé sous forme de base de données et graphique dans l'onglet *Synthèse*.

Le **tableau de scénarisation** (dans l'onglet scénario de l'*Outil Scénario Energie*) est décomposé en 3 sections :

1. Classification et description des actions
2. Paramètre et calendrier des actions
3. Quantification des actions

Pour plus de détail, lire les explications des onglets *Index* des fichiers

Annexe 11 : Socle: Rénovations engagées, développement net du patrimoine



Actions d'efficacité énergétique

- Rénovation des enveloppes des bâtiments
- Rénovation des équipements des bâtiments
- Renouvellement du réseau de chaleur
- Optimisation des outils de production centralisés d'énergie

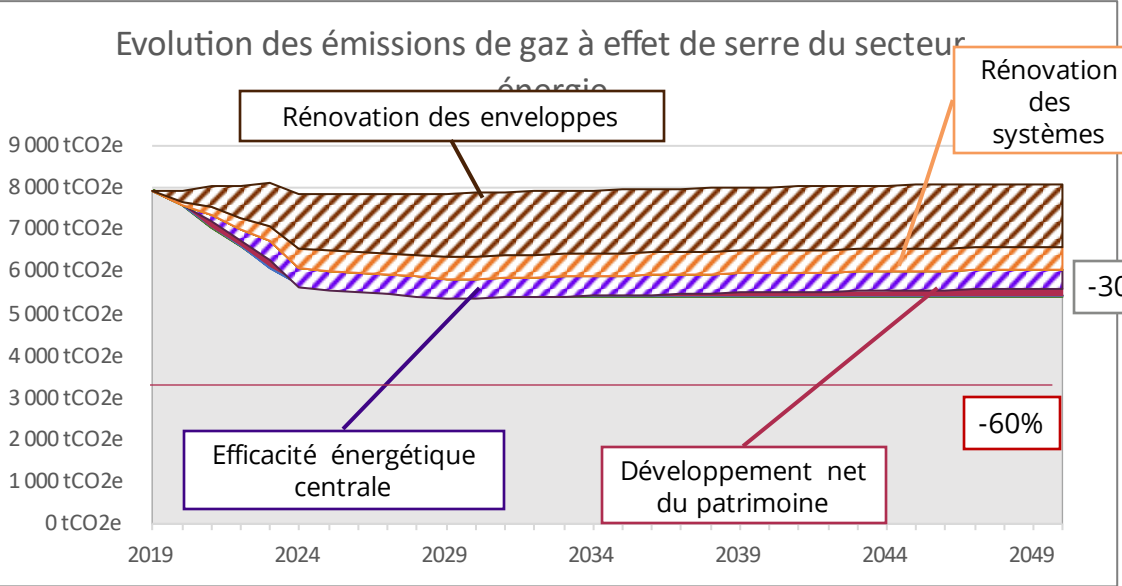
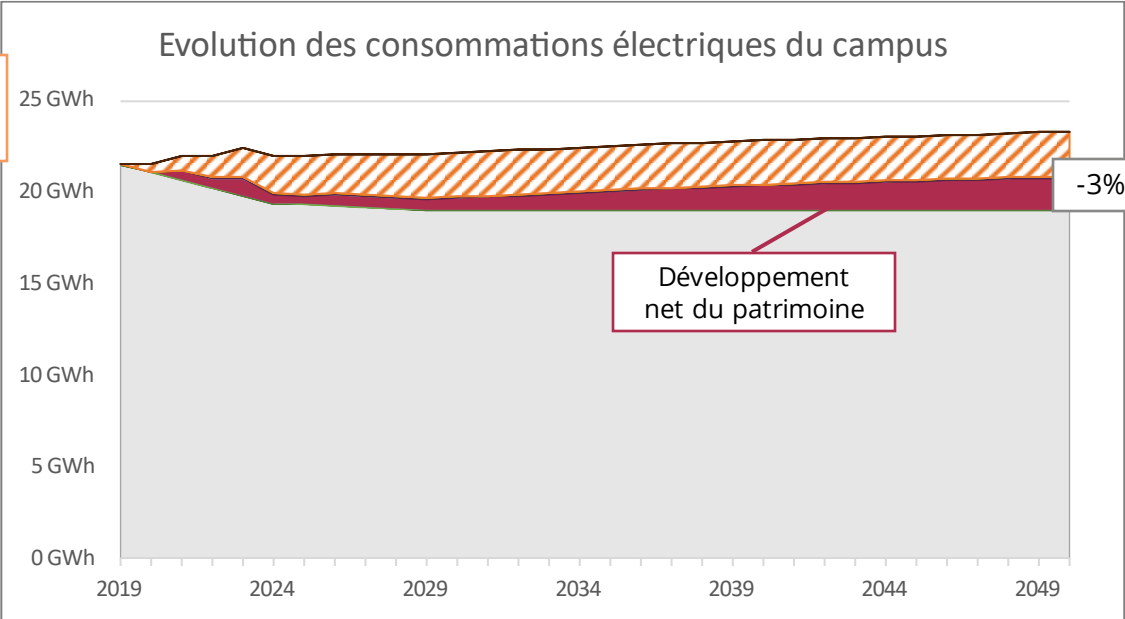
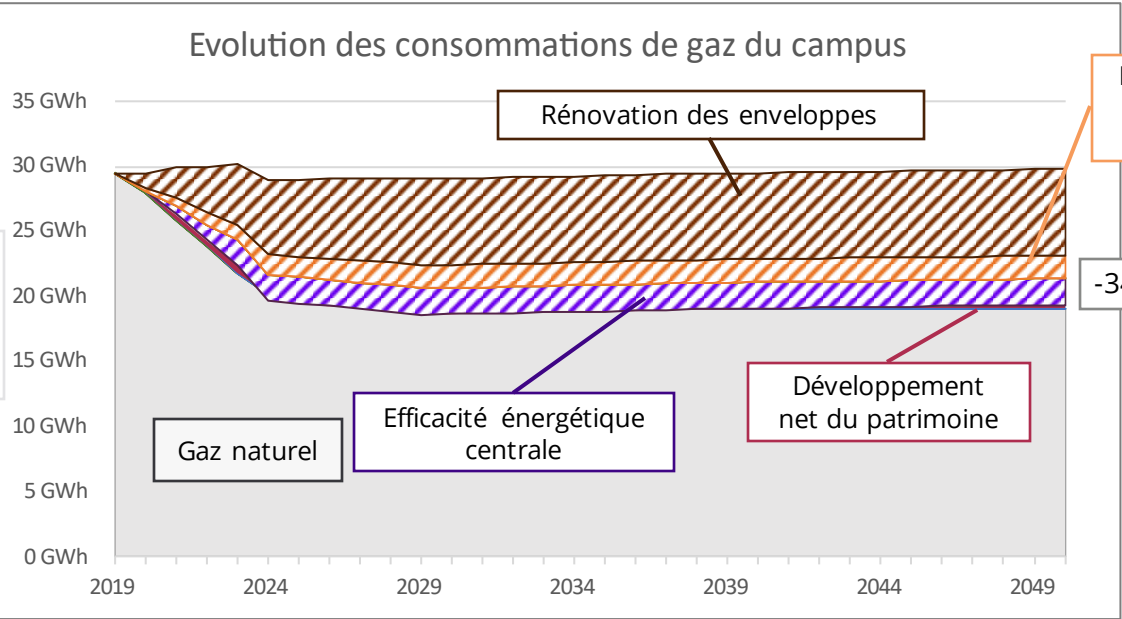
Productions d'énergie

- Récupération de chaleur fatale sur les groupes froid
- Production d'énergie renouvelable
- Achat d'énergie renouvelable (biométhane et/ou électricité d'origine renouvelable)
- Consommations de gaz

Impacts

- Augmentation des consommations et/ou émissions
- Réduction des consommations et/ou émissions
- Développement net du patrimoine





Actions d'efficacité énergétique

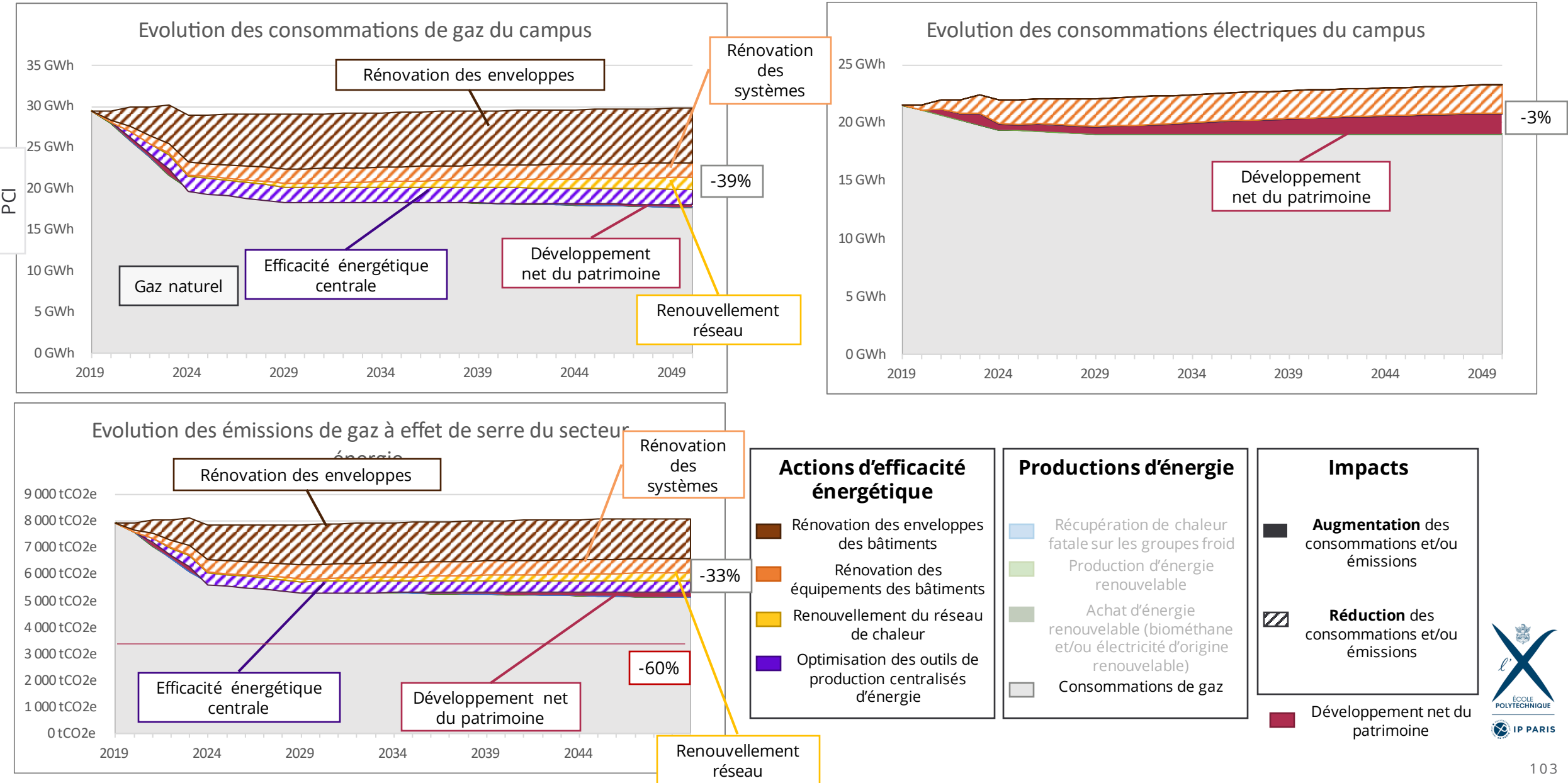
- Rénovation des enveloppes des bâtiments
- Rénovation des équipements des bâtiments
- Renouvellement du réseau de chaleur
- Optimisation des outils de production centralisés d'énergie

Productions d'énergie

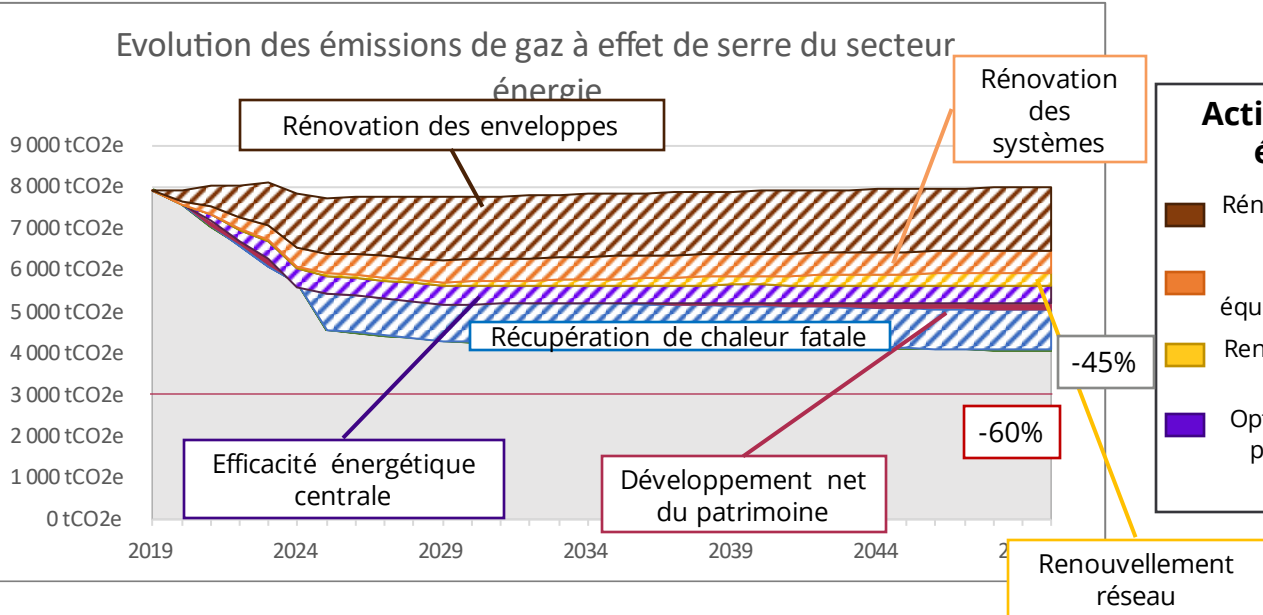
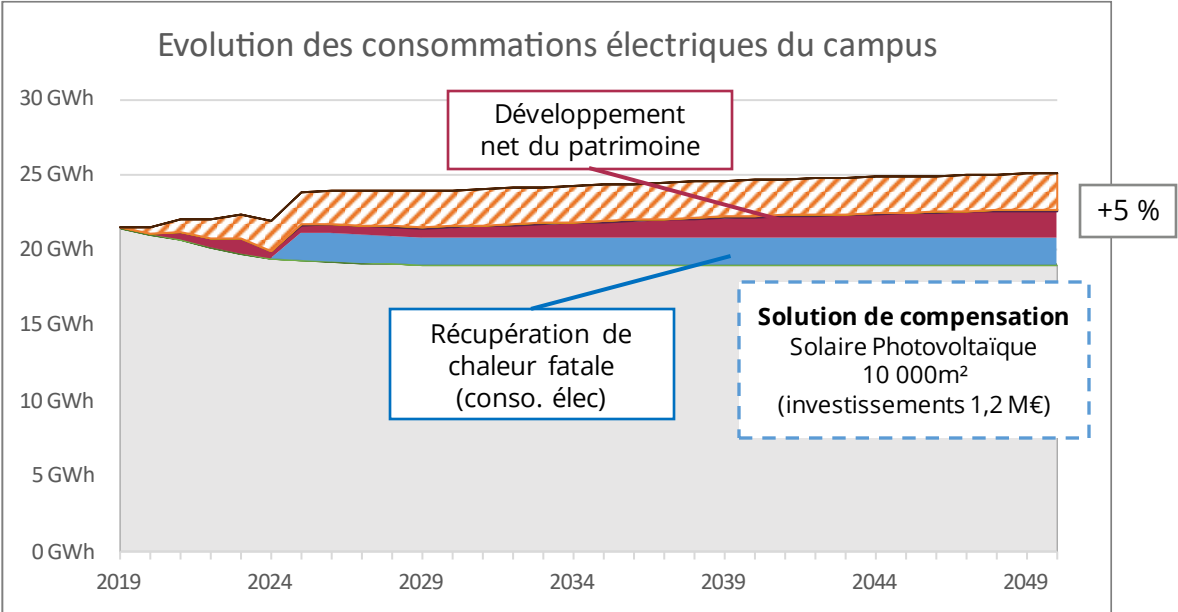
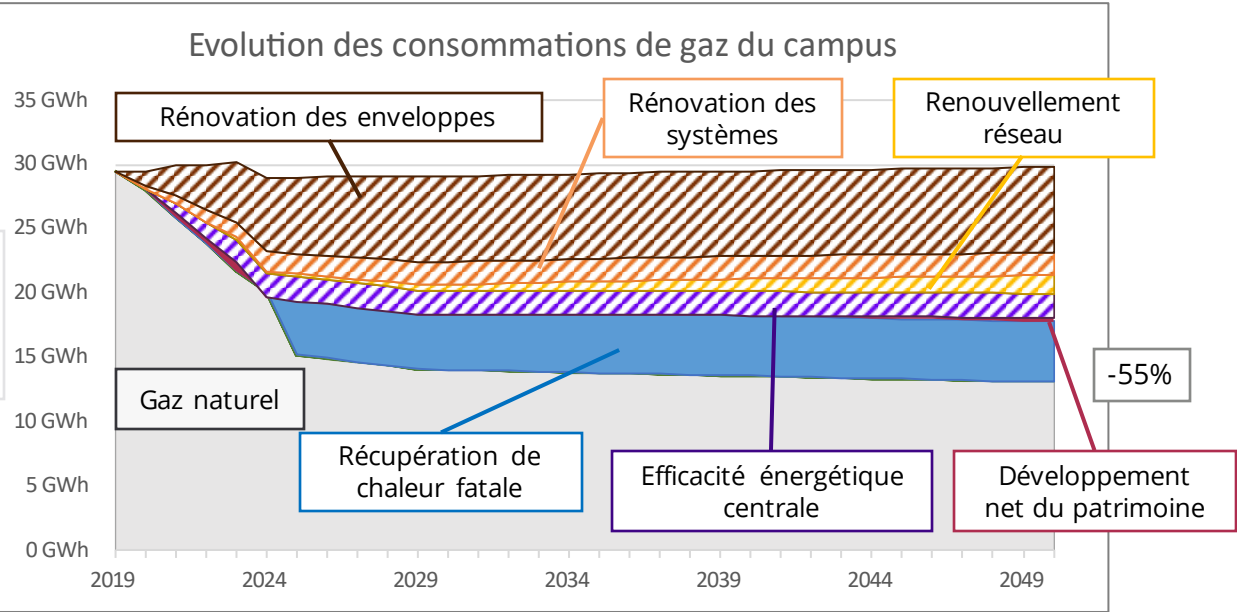
- Récupération de chaleur fatale sur les groupes froid
- Production d'énergie renouvelable
- Achat d'énergie renouvelable (biométhane et/ou électricité d'origine renouvelable)
- Consommations de gaz

Impacts

- Augmentation des consommations et/ou émissions
- Réduction des consommations et/ou émissions
- Développement net du patrimoine



Annexe 14 : Etape 3: Rénovations engagées, développement net du patrimoine, optimisation centrale, renouvellement du réseau et récupération de chaleur fatale



Actions d'efficacité énergétique

- Rénovation des enveloppes des bâtiments
- Rénovation des équipements des bâtiments
- Renouvellement du réseau de chaleur
- Optimisation des outils de production centralisés d'énergie

Productions d'énergie

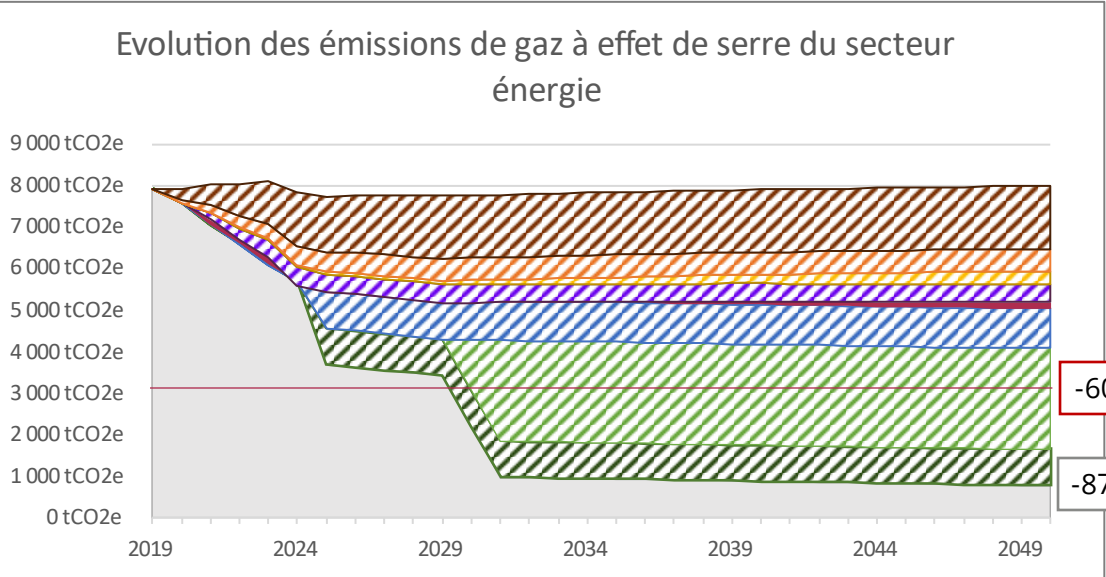
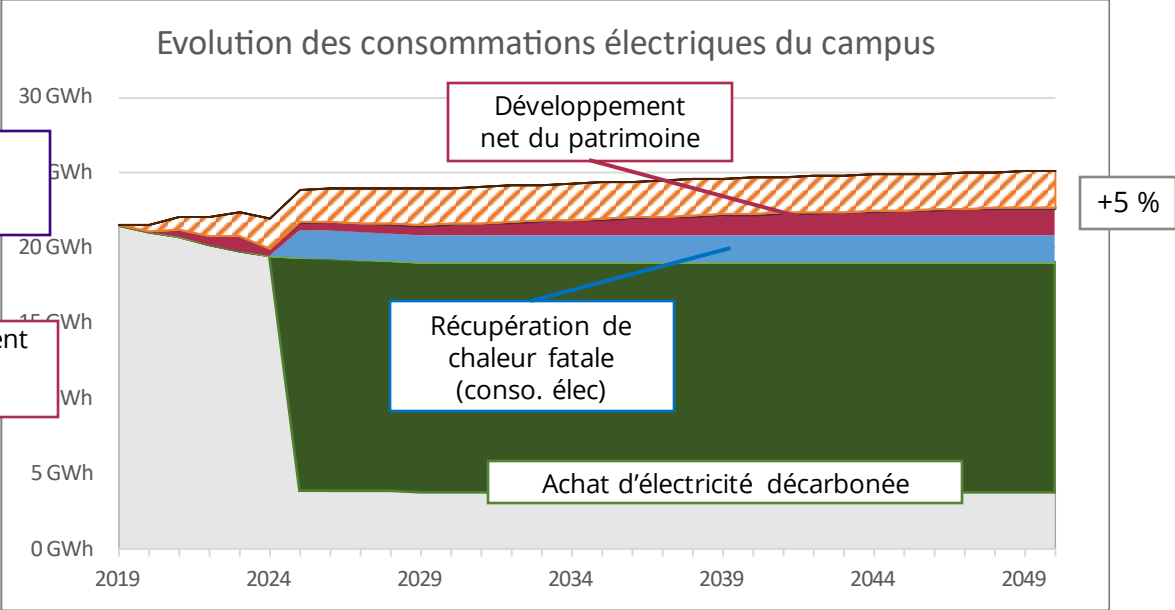
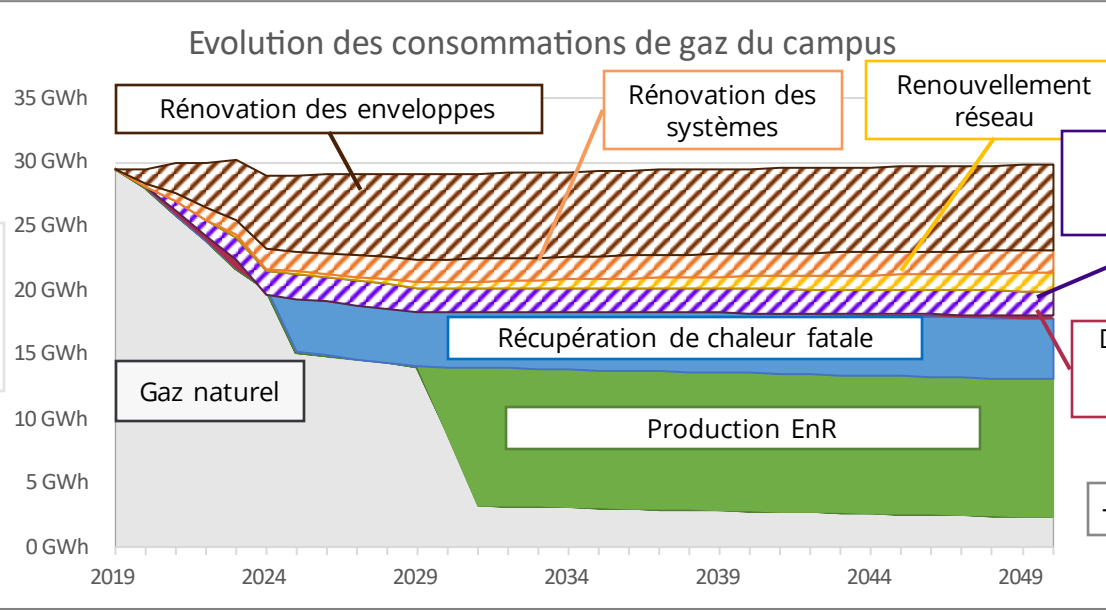
- Récupération de chaleur fatale sur les groupes froid
- Production d'énergie renouvelable
- Achat d'énergie renouvelable (biométhane et/ou électricité d'origine renouvelable)
- Consommations de gaz

Impacts

- Augmentation des consommations et/ou émissions
- Réduction des consommations et/ou émissions
- Développement net du patrimoine



Annexe 15 : Etape 4: Rénovations engagées, développement net du patrimoine, optimisation centrale, renouvellement du réseau, récupération de chaleur fatale et développement EnR



Actions d'efficacité énergétique

- Rénovation des enveloppes des bâtiments
- Rénovation des équipements des bâtiments
- Renouvellement du réseau de chaleur
- Optimisation des outils de production centralisés d'énergie

Productions d'énergie

- Récupération de chaleur fatale sur les groupes froid
- Production d'énergie renouvelable
- Achat d'énergie renouvelable (biométhane et/ou électricité décarbonée)
- Consommations de gaz

Impacts

- Augmentation des consommations et/ou émissions
- Réduction des consommations et/ou émissions
- Développement net du patrimoine

