

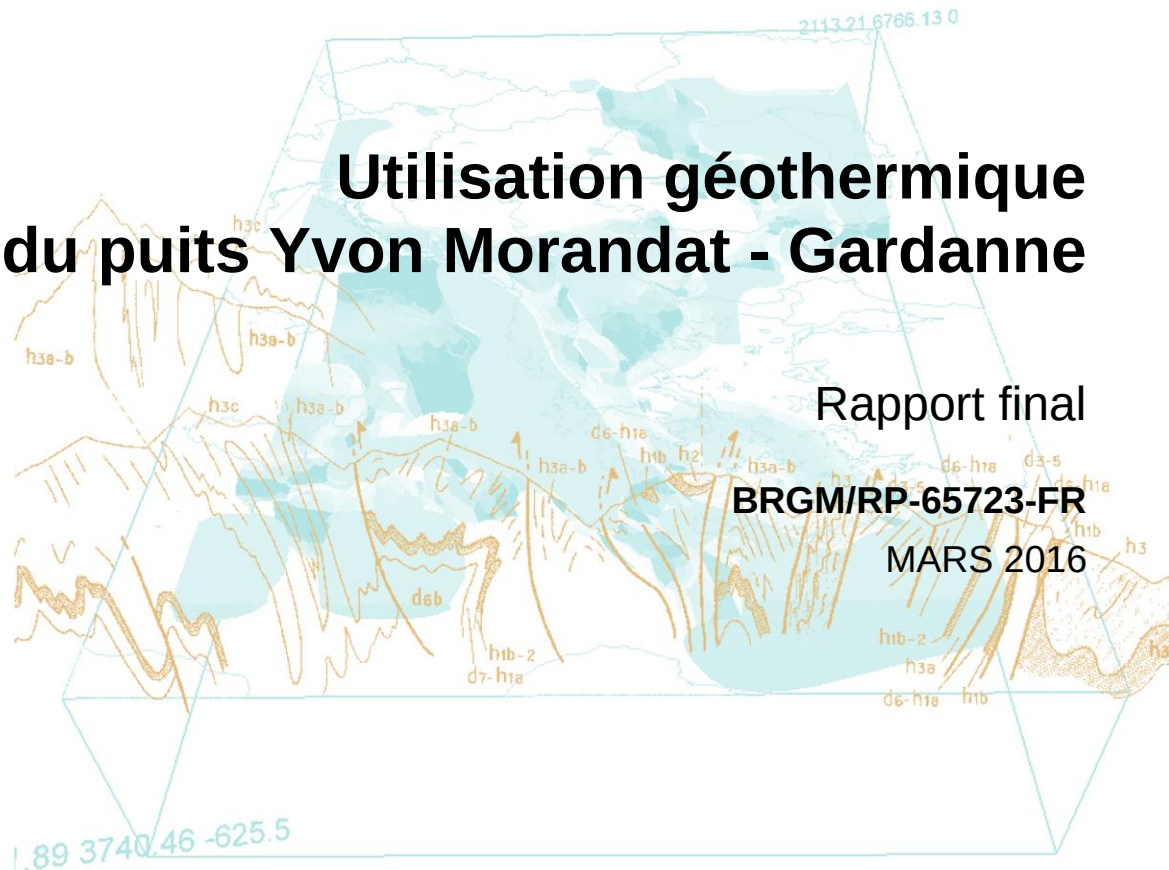


Utilisation géothermique du puits Yvon Morandat - Gardanne

Rapport final

BRGM/RP-65723-FR

MARS 2016



Utilisation géothermique du puits Yvon Morandat - Gardanne

Rapport final

BRGM/RP-65723-FR

Mars 2016

Étude réalisée dans le cadre des opérations
de Service public du BRGM 2015

H. Lesueur

Vérificateur :

Nom : M. MOULIN

Fonction : Hydrogéologue PACA

Date : 01/06/2016

Signature :



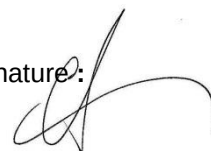
Approbateur :

Nom : C. ARNAL

Fonction : Directrice régionale PACA

Date : 29/6/2016

Signature :



Le système de management de la qualité et de l'environnement
est certifié par AFNOR selon les normes ISO 9001 et ISO 14001.

Mots-clés : GEOTHERMIE ; PUIITS DE MINE ; ENERGIE THERMIQUE ; RESEAU DE CHALEUR ; PREFAISABILITE ; GARDANNE

En bibliographie, ce rapport sera cité de la façon suivante :

Lesueur H. (2016) – Utilisation géothermique du puits Yvon Morandat - Gardanne. Rapport final. BRGM/RP-65723-FR, 218 p., 104 fig., 26 tabl., 5 ann.

Synthèse

A l'échelon de la préfaisabilité, la présente étude examine les solutions techniques qui seraient applicables pour exploiter un ancien puits de mine, le Puits Y, à des fins de confort thermique pour les locaux de la ZA Morandat qu'il est programmé d'aménager à Gardanne. Une surface de planchers de 48 000 m² à 65 500 m² est prise en considération comportant 8 000 m² de locaux rénovés ou à rénover, essentiellement dédié à des activités tertiaires et économiques. Les aménagements sont prévus en trois tranches livrées entre 2018 et 2021.

La présente étude de préfaisabilité technique s'applique aux contours d'un système visant, en priorité, l'exploitation du Puits Y dont il s'avère que la particularité est de constituer un réservoir d'eau souterrain de l'ordre de 60 000 m³ et dont la température naturelle se situe actuellement à moins de 30 °C.

Quatre grandes options d'exploitation du Puits Y ont ainsi été formalisées dans une première phase ; phase durant laquelle a également été examinée une solution de repli sur champ de sondes géothermiques qui est déclinée en trois grandes options.

A la question de l'aménageur de savoir s'il paraît possible d'exploiter le Puits Y dans un système énergétique, la réponse de la présente étude est donc positive mais sous réserves.

Plus précisément, du fait des contraintes imposées par le niveau de l'eau dans le Puits Y à environ -300 m sous la surface et par la capacité thermique limitée du Puits Y, l'équipement du Puits Y et son mode d'exploitation doivent être adaptés ; ce qui paraît techniquement envisageable bien que nécessitant des développements spécifiques.

Dans le contexte de la ZA Morandat, l'emploi du Puits Y ne peut s'envisager que comme composant d'un système exploitant un réseau d'énergie ; le Puits Y jouant alors exclusivement le rôle d'un réservoir de stockage d'énergie thermique. En cela, l'exploitation du Puits Y ne peut aucunement être assimilée à une exploitation géothermique conventionnelle.

Une première phase de simulation sommaire, envisageant des pompes à chaleur réparties le long d'un réseau d'énergie en boucle tempérée pour le chauffage comme pour la climatisation, a montré que la capacité de stockage thermique matérialisé par le Puits Y correspond approximativement aux besoins en chaleur durant la saison hivernale, cela en prenant comme hypothèse un ΔT de 15 °C entre la température basse dans le Puits Y en fin de saison hivernale et la température haute dans le Puits Y en fin de saison estivale.

Cette exploitation du Puits Y pour fournir la chaleur hivernale n'est envisageable qu'à la condition d'être en mesure de réinjecter une quantité équivalente de chaleur en période estivale, ladite chaleur estivale provenant alors des rejets des climatisations.

Les estimations des besoins totaux en chauffage et en climatisation avaient préalablement été proposées par le bureau d'étude BG à l'échelle de la ZA Morandat. Or, ces estimations conduiraient à une réinjection de chaleur supérieure aux puisages de chaleur.

Par voie de conséquence, il peut être recommandé un réexamen de l'équilibre entre besoins en rafraîchissement et besoins de chaleur afin de maintenir la température du Puits Y sous une valeur de l'ordre de 30 °C à 35 °C en fin de saison estivale.

Pour être complète, la première phase de la présente étude de préfaisabilité technique a également examiné succinctement les possibilités techniques permettant d'accroître la capacité thermique du Puits Y, un mode d'exploitation alternatif à plus haute température et une solution géothermique de repli sur champ de sondes géothermique.

La première phase d'étude a fait ressortir deux modes principaux pour l'exploitation du Puits Y :

- Le mode d'exploitation de référence pour le système énergétique de la ZA Morandat repose sur une distribution de l'énergie dite en "boucle tempérée" dont le niveau de la température, typiquement inférieur à 30 °C, permet indifféremment les usages pour le chauffage, l'eau chaude sanitaire et le rafraîchissement des locaux. Des pompes à chaleur sont alors requises pour tous les usages.
- Le mode d'exploitation alternatif repose sur une distribution de l'énergie à une température suffisamment élevée pour permettre le chauffage direct des locaux (>40 °C) et pour contribuer au bon fonctionnement de dispositifs thermodynamiques à sorption assurant le rafraîchissement des locaux. Cette technologie alternative implique la disponibilité de relativement importantes ressources thermiques renouvelables ou fatales ; le Puits Y servant alors de réservoir de stockage jusqu'à une température de 70°C environ mais avec une préférence pour une température inférieure à 50 °C limitant les pertes thermiques.

In fine, sept options et variantes sont apparues techniquement envisageables (Figure 1).

Le Comité de Pilotage du 12 janvier 2016 a demandé à ce que soient approfondis trois scénarios en seconde phase, à savoir deux scénarios d'exploitation du Puits Y et un troisième avec une solution géothermique connue afin d'établir une référence technico-économique.

- **Scénario 1-** Le premier scénario considère le Puits Y comme un réservoir d'énergie thermique dont le niveau de la température est maintenu suffisamment bas pour pouvoir être utilisé pour le chauffage, pour l'ECS et pour la climatisation ; ces trois usages recourant à des pompes à chaleur à compression mécanique pour adapter le niveau de la température. La distribution de l'énergie thermique se fait *via* un réseau en boucle tempérée, typiquement à moins de 30 °C.

Pour être pérenne, ce système impose que les quantités d'énergie puisées dans le Puits Y pour le chauffage et pour l'ECS (eau chaude sanitaire) soit légèrement plus importantes que les rejets thermiques des climatisations qui y sont réinjectés.

Dans ce contexte, la température dans le Puits Y tend à rester relativement homogène du fait des phénomènes de convection naturelle entretenus par une température des roches profondes supérieure à celle de l'eau dans le Puits Y.

- **Scénario 2-** Le second scénario considère le Puits Y comme un réservoir d'énergie thermique dont le niveau de la température est maintenu à relativement haute température (typiquement entre 40 °C et 50 °C) autorisant le chauffage par usage direct de la chaleur et, comme souhaité par le Comité de Pilotage, pouvant contribuer au fonctionnement de climatisations à sorption.

Ce scénario implique l'accès à des ressources thermiques renouvelables ou fatales en remplacement de l'énergie mécanique ou électrique des pompes à chaleur à compresseur des scénarios 1 et 3, le Puits Y servant alors de réservoir de stockage. L'analyse a été conduite sur la base d'une énergie thermique fournie par des panneaux solaires plans.

Dans ce contexte, une stratification de la température peut être constatée sur la hauteur du Puits Y avec une plus haute température en partie supérieure.

- **Scénario 3-** Le troisième scénario recourt à la technique du champ de sondes géothermiques (BTES – Borehole Thermal Energy Storage) qui est exploité de manière comparable au scénario 1, c'est-à-dire avec une distribution *via* un réseau en boucle tempérée et à des pompes à chaleur à compression mécanique. Toutefois, la température de fonctionnement est inférieure d'une dizaine de degrés à celle du scénario 1.

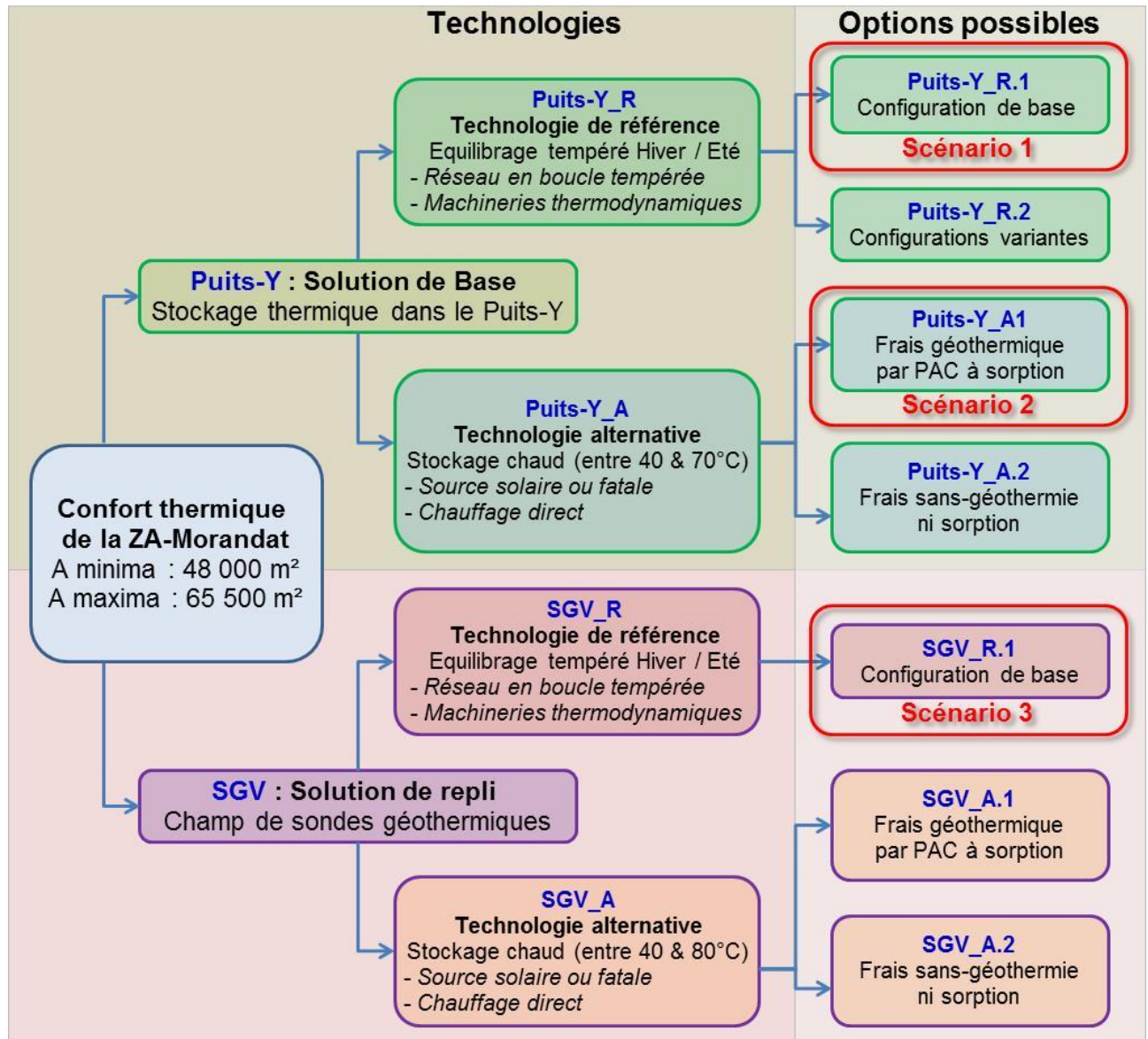


Figure 1 : Schéma logique des options technologiques identifiées par l'étude

En s'appuyant notamment sur les publications récentes, il a été constaté que le Puits Y se caractérise comme étant un Puits dit "aveugle", c'est-à-dire avec des connexions hydrauliques extrêmement réduites avec le réseau de galeries minières. En effet, les recettes sont exclusivement localisées en partie basse et tout le cuvelage au-dessus de ces recettes est considéré comme étant étanche. De ce fait, du point de vue thermique, le Puits Y doit avant tout être considéré comme un réservoir de stockage caractérisé par des échanges thermiques aux parois assez limités au regard de la capacité de stockage thermique. Les pertes thermiques restent donc assez faibles lorsque la température de l'eau dans le stock ne s'écarte que d'une dizaine de degrés de la température naturelle des roches (**Scénario 1**). Les pertes sont plus sensibles dans les autres cas (**Scénario 2**).

Le Puits Y est ennoyé sur une hauteur d'environ 800 m. Actuellement, du fait des phénomènes de convection naturelle, la température de l'eau varie peu sur toute la hauteur ennoyée ; la température de l'eau s'établissant à une valeur moyenne entre la température des roches au fond et la température des roches à la hauteur du niveau de l'eau. Le dernier log thermique de

2013 dans le Puits Y montre des températures de 24,2°C à la côte -60 m NGF et de 25,5 °C à la côte de -860 m NGF (fond du Puits Y), la température moyenne étant de 24°C.

Néanmoins, la température au niveau de la couche "Grande Mine", calcaires du Fuvélien au niveau des recettes a été estimée à une valeur de 28°C à cette même période. En rappelant qu'à la côte de -800 m NGF, les deux forages de reconnaissance de 1965 indiquaient des températures de 32°C et 38°C, on peut légitimement conclure que l'abaissement temporaire de la température constaté du fait de l'exploitation minière et des venues d'eau d'ennoiement, *a priori* relativement fraîche, devrait progressivement s'estomper.

Aussi, la présente étude propose de considérer que la température moyenne de l'eau dans le Puits Y tendrait naturellement à s'établir au niveau de la température moyenne entre la température indicative à la côte -60 m NGF (21°C) et celle à la côte -860 m NGF (36°C) selon les relevés de 1965, à savoir 28°C *a minima*.

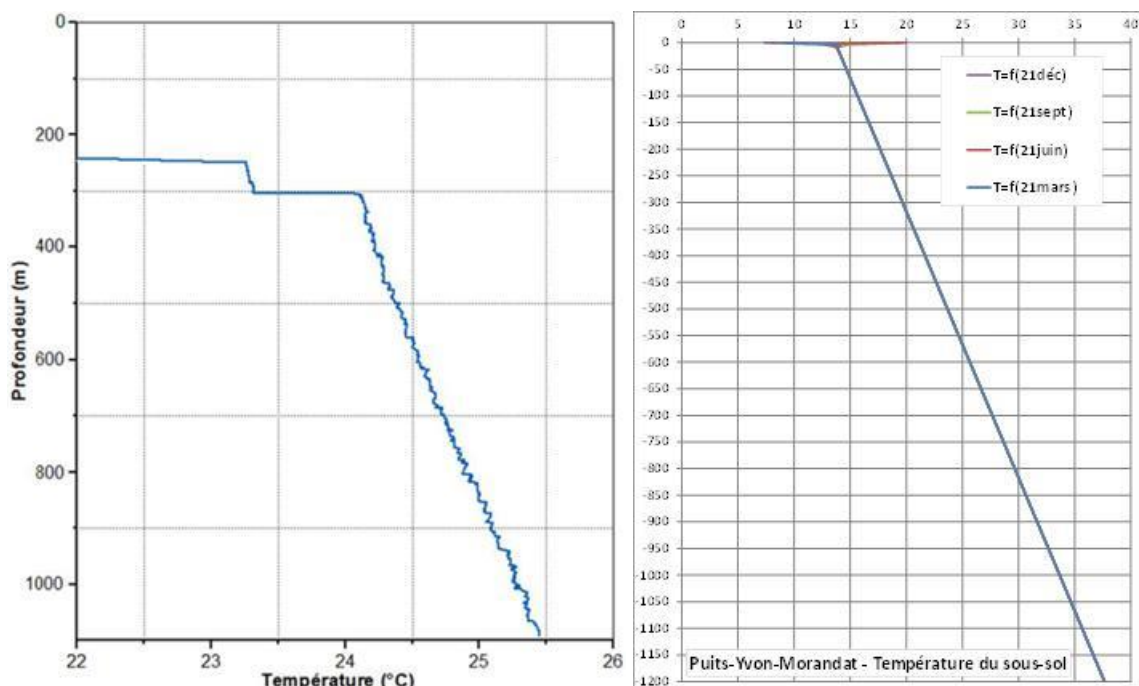


Figure 2 : Log thermique de 2013 dans le Puits Y (rapport BRGM/RP-63559) et profil thermique conforme aux relevés de 1965 et calculé pour un gradient géothermique de 0.02°C/m

Pour le scénario 1, en référence à des réseaux d'énergie thermique récemment mis en service, il a été considéré qu'un réseau de chauffage en boucle tempérée pouvait être raccordé au Puits Y et que, dans ce cas, une température de retour de l'ordre de 13°C était réaliste. Dans ce cas, un ΔT de l'ordre de 15 °C pourrait être représentatif ; ce qui correspond à une capacité thermique du stockage de l'ordre de 1,3 GWh si l'on tient compte du volume d'eau dans le Puits Y et du volume des roches thermiquement impactées au voisinage immédiat du cuvelage. Du fait du relativement faible volume concerné, si une telle énergie (1,3 GWh) est puisée en saison hivernale, alors elle doit être compensée par l'injection d'une énergie thermique du même ordre en saison estivale, au risque de constater une dérive thermique progressive de la température du puits conduisant à une dégradation de la performance énergétique, c'est-à-dire de la facture en énergie électrique nécessaire au fonctionnement des machineries thermodynamiques raccordées au réseau en boucle tempérée.

Or, en l'état des projets d'aménagement, la demande thermique de la ZA Morandat, pourrait être fortement déséquilibrée du fait de la forte demande en rafraîchissement des locaux ; ce déséquilibre pouvant être accentué si diverses activités exigent le refroidissement d'équipements, ce qui serait le cas si un Data Center devait être raccordé. Sans adaptation de

la performance énergétique des locaux raccordés, un fort risque de déséquilibre thermique dans le sens d'un réchauffement rapide du Puits Y serait constaté ; ce qui induirait une dégradation rapide des performances des groupes-frigorifiques jusqu'à rendre la ressource inapte pour de la climatisation conventionnelle. Au moins pour le scénario 1, la présente étude recommande donc au maître d'ouvrage d'envisager un abaissement des besoins en climatisation raccordés au Puits Y afin d'assurer l'équilibrage des puisages de chaleur en saison hivernale et des réinjections de chaleur en période estivale.

Dans le scénario 1, la distribution s'opère en boucle tempérée et suppose que des machineries thermodynamiques de type "Thermo-Frigo-Pompe" réparties au niveau de chaque sous-station optimisent localement la gestion des énergies thermique, par exemple en produisant l'ECS avec les excédents de la climatisation. De ce fait, les deux principales options à disposition du maître d'ouvrage pour limiter les impacts pénalisants d'une trop forte demande en climatisation sont :

- 1) Moins climatiser tout ou partie des locaux
- 2) Doter le réseau d'un appoint en climatisation aérothermique et/ou solaire

Pour le scénario 2, en raison de l'ensoleillement et de la possible disponibilité de ressources thermiques fatales, il est considéré l'hypothèse de porter le réservoir de stockage constitué par le Puits Y à un niveau de température pouvant théoriquement atteindre 70°C, voire 80°C, s'il est démontré que le cuvelage peut supporter durablement un tel niveau de la température. Dans le scénario 2, le chauffage et l'ECS sont assurés sans recourir à des pompes à chaleur. Par contre, pour assurer le rafraîchissement des locaux, les deux principales options sont les i) groupes frigorifiques aérothermiques à compression mécanique et ii) les groupes à sorption (adsorption ou absorption) exploitant une haute température (>65 °C) ; des dispositifs aérothermiques étant indispensables dans les deux cas pour évacuer la chaleur résiduelle.

Les machineries à sorption ont des rendements énergétiques faibles mais économiquement attractifs lorsque les ressources thermiques sont abondantes et à coûts résultants faibles. Typiquement, le rendement d'un tel dispositif sera de l'ordre de 0,4 à 0,5 lorsque la température de la ressource est inférieure à 70°C et pourra dépasser 0,6 lorsque la température dépasse 80°C. Pour mémoire, un rendement de 0,5 signifie qu'il faut disposer d'une ressource thermique de 1 kWh pour extraire du bâtiment climatisé une énergie thermique de 0,5 kWh.

En première approche, un dispositif à sorption présente un réel intérêt environnemental uniquement si la fraction d'énergie thermique renouvelable ou fatale représente plus de 70 % de la chaleur fournie ; le reste correspondant à l'énergie électrique pour les auxiliaires (stockage, pompes, ventilateurs ...) et à l'éventuel appoint thermique. Dans la présente étude, il est supposé que la chaleur fournie aux dispositifs à sorption est une combinaison de la chaleur déstockée issue du Puits Y et de la chaleur solaire ou fatale en usage direct, éventuellement via un petit stockage court-terme. Dans le cas spécifique de Gardanne, région assez fortement ensoleillée, il ressort que le Puits Y serait très peu sollicité par les climatisations à Sorption (sauf à ne pas installer de réservoir tampon en surface) et n'aurait pas à assurer l'intégralité de la fourniture thermique pour le chauffage et l'ECS.

Pour le scénario 3, il est considéré l'hypothèse d'une solution de repli en champ de sondes géothermiques qui serait appliquées à tout ou partie de la ZA Morandat ; la distribution d'énergie thermique restant similaire à celle du scénario 1. En cela, le but est de constituer une référence de comparaison économique, tant pour l'investissement que pour le fonctionnement. Cette référence économique complète le référentiel usuel considérant le gaz pour le chauffage et les groupes froids aérothermiques conventionnels pour la climatisation.

Pour compléter les trois **Scénarios**, l'étude a estimé ce que pourrait représenter l'appoint nécessaire en matière de climatisation.

Sommaire

Synthèse	3
1. Contexte et objectifs	19
2. Phase 1 : Examen initial du contexte	23
2.1. SPECIFICITE DU CONTEXTE	23
2.2. PARTICULARITES DE LA RESSOURCE THERMIQUE DU PUITS Y	24
2.3. PARTICULARITES DES BESOINS THERMIQUES EN SURFACE	26
2.3.1. Objectifs et contraintes	26
2.3.2. Demandes annuelles en énergie thermique	26
2.3.3. Aménagement de référence pour la ZA Morandat	27
2.3.4. Surfaces minimales envisagées sur la ZA Morandat	28
2.3.5. Surfaces maximale escomptées sur la ZA Morandat	28
2.3.6. Problématique d'un éventuel data center	30
2.4. CONCLUSION PARTIELLE DU CHAPITRE	30
3. Phase 1 : Examen de l'état de l'art applicable	31
3.1. SOLUTIONS GEOTHERMIQUES - SCHEMAS DE PRINCIPE	31
3.1.1. Solutions en boucle ouverte de type "PACP"	31
3.1.2. Solution en boucle fermée de type "simple U" ou "double U"	33
3.1.3. Solution en boucle fermée de type "coaxiale "	36
3.2. USAGE DIRECT ET MACHINERIE THERMODYNAMIQUE	40
3.2.1. Usage direct : chauffage et rafraichissement	40
3.2.2. Pompe à chaleur : chauffage, eau chaude sanitaire et climatisation	41
3.3. FAVORABILITE DE LA TEMPERATURE D'UNE RESSOURCE	43
3.4. DISTRIBUTION EN RESEAU D'ENERGIE - SCHEMAS DE PRINCIPE	44
3.4.1. Boucle tempérée et pompes à chaleur distribuées	44
3.4.2. Distribution en boucle tempérée "2 tubes"	45
3.4.3. Distribution en double boucle tempérée "3 tubes" ou "4 tubes"	46
3.4.4. Solutions proposée par le bureau d'étude BG	47
3.5. CONCLUSION PARTIELLE DU CHAPITRE : LE PUITS Y, AVANT TOUT UN RESERVOIR D'EAU	48
3.5.1. Réservoir d'eau matérialisé par le Puits Y	48
3.5.2. Température non-perturbée au voisinage du Puits Y	48
3.5.3. Température de l'eau dans le Puits Y	49
3.5.4. Ordre de grandeur des Quantités d'énergie accessibles	50

3.5.5. Echanges thermiques au voisinage du Puits Y	51
3.5.6. Contribution négligeable du flux géothermique	51
4. Phase 1 : Systèmes énergétiques de référence.....	53
4.1. RESSOURCE GEOTHERMIQUE A 28°C (SOURCE : DALKIA).....	53
4.1.1. Synthèse des données et paramètres du système énergétique implanté au Fort d'Issy les Moulineaux	54
4.1.2. Analyse sommaire de l'installation du Fort d'Issy.....	54
4.2. STOCKAGES THERMIQUES SOUTERRAINS DE GRANDE CAPACITE.....	55
4.2.1. Cas des stockages en réservoir enterrés.....	56
4.2.2. Cas des stockages géothermiques dans les formations géologiques	59
5. Phase 1 : Options d'aménagement du Puits Y.....	63
5.1. PRESENTATION DES DIFFERENTES OPTIONS IDENTIFIEES	63
5.1.1. Option d'aménagement A) - Pas d'aménagement du Puits Y	64
5.1.2. Option d'aménagement B) - Bouchon semi-étanche fixe	65
5.1.3. Option d'aménagement C) - Bouchon semi-étanche mobile	66
5.1.4. Option d'aménagement D) - Bouchon étanche fixe.....	67
5.2. EXPRESSION DES CONDITIONS DE REFERENCE POUR L'EXPLOITATION.....	69
5.2.1. Préambule	69
5.2.2. Energie disponible dans le Puits Y et Convention de comptabilisation de l'énergie thermique échangée avec le Puits Y	69
5.2.3. Profils météorologiques sur le secteur de la ZA Morandat.....	69
5.2.4. Expression des demandes thermiques de référence	71
5.2.5. Réseau de distribution de référence	72
5.2.6. Durées de fonctionnement des équipements.....	73
5.3. EXAMEN DE LA CONFIGURATION A).....	75
5.3.1. Investigations pour une surface <i>a minima</i> de 48 000 m ²	76
5.3.2. Investigations pour une surface de l'ordre de 65 000 M ²	84
5.3.3. Discussion	91
5.3.4. Conclusions intermédiaires et recommandations pour la suite	92
5.4. EXAMEN DES CONFIGURATIONS B) ET C) POUR LE PUITS Y	93
5.4.1. Principales caractéristiques du fonctionnement de la configuration B) :.....	95
5.4.2. Principales caractéristiques du fonctionnement de la configuration C) :.....	95
5.4.3. Discussion et conclusions intermédiaires	96
5.5. EXAMEN DE LA CONFIGURATION D) DANS LE PUITS Y	100
5.5.1. Configuration D) et exploitation en boucle fermée	100
5.5.2. Configuration D) et exploitation en boucle ouverte	101

5.5.3. Discussion et conclusions intermédiaires	102
6. Phase 1 : Technologie alternative à haute température	103
6.1. OBJECTIFS ET ETAT DE L'ART	103
6.1.1. Utilisation de la chaleur pour le chauffage direct	104
6.1.2. Utilisation de la chaleur pour produire également de l'eau glacée	105
6.2. ORDRES DE GRANDEUR POUR L'ENSEMBLE DES BESOINS THERMIQUES	106
6.2.1. Hypothèse pour une source d'origine solaire	106
6.2.2. Reformulation des demandes du bâti	106
6.2.3. Estimation empirique de la surface de panneaux solaires	108
6.2.4. Validation l'estimation de la surface de panneaux solaires	109
6.2.5. Puissances thermiques en jeu dans le stockage (Puits Y)	111
6.2.6. Impacts sur le réseau de chaleur	111
6.2.7. Utilisation d'une source d'énergie thermique fatale	111
7. Phase 1 : Solution de repli sur champ de SGV	113
7.1. PRESENTATION	113
7.2. CAS DU CHAMP DE SONDES EN BOUCLE TEMPEREE POUR 65 000 M ²	114
7.3. CAS DU CHAMP DE SONDES A HAUTE TEMPERATURE POUR 65 000 M ²	115
8. Phase 1 : Synthèse résumée	117
8.1. SOLUTION DE BASE : AMENAGEMENT A <i>MINIMA</i> DU PUITS Y	117
8.1.1. Puits Y : Technologies de référence ⇔ Stockage alterné et Boucle tempérée	117
8.1.2. Puits Y : technologies alternative ⇔ Stockage chaud et Réseau de chaleur	118
8.1.3. Technologies d'échange de chaleur dans le Puits Y	119
8.1.4. Pour information : Variantes d'aménagement du Puits Y	120
8.2. SOLUTION DE REPLI : CHAMP DE SONDES GEOTHERMIQUES (SGV)	122
8.2.1. Champ de sondes géothermiques : Technologies de référence et alternative	122
8.3. RESEAUX DE DISTRIBUTION DE L'ENERGIE THERMIQUE	124
8.3.1. Réseau de distribution de référence en boucle tempérée	124
8.3.2. Distribution alternative en réseau de chaleur	125
8.4. FICHES DE PRESENTATION DES 7 OPTIONS POSSIBLES	126
8.4.1. Puits Y_R.1 : Configuration de base dans le Puits Y	127
8.4.2. Puits Y_R.2 : Configurations variantes dans le Puits Y	128
8.4.3. Puits Y_A.1 : Configuration alternative avec frais par absorption	129
8.4.4. Puits Y_A.2 : Configuration alternative et frais sans géothermie ni sorption	130
8.4.5. SGV_R.1 : Repli de base en champ de sondes géothermiques	131

8.4.6.SGV_A.1 : Repli alternatif avec rafraichissement par sorption.....	132
8.4.7.SGV_A.2 : Repli alternatif et rafraichissement sans géothermie ni sorption.....	133
9. Phase 2 : Approfondissement de trois scénarios.....	135
9.1. NOTE INTRODUCTIVE.....	135
9.2. CONDITIONS GENERALES DE L'EXAMEN DES TROIS SCENARIOS.....	137
9.3. RESEAU PRIMAIRE D'ENERGIE SIMILAIRE POUR LES TROIS SCENARIOS.....	138
9.4. EXAMEN DU SCENARIO 1 – EXPLOITATION TEMPEREE DU PUIT Y.....	140
9.4.1.Présentation du scénario 1 - Stockage alterné dans le Puits Y, Boucle tempérée	140
9.4.2.Indicateurs économiques et performantiels pour le scénario 1	141
9.4.3.Eléments d'investissement spécifiques au scénario 1	145
9.5. EXAMEN DU SCENARIO 2 – PUIT Y PORTE A HAUTE TEMPERATURE	146
9.5.1.Présentation du scénario 2 - Stockage chaud dans le Puits Y, Réseau de chaleur	146
9.5.2.Indicateurs économiques et performantiels pour le scénario 2	147
9.5.3.Eléments d'investissement spécifiques au scénario 2	150
9.6. EXAMEN DU SCENARIO 3 – CHAMP DE SONDES GEOTHERMIQUES.....	151
9.6.1.Présentation du scénario 3 – Champ de sondes et Boucle tempérée.....	151
9.6.2.Indicateurs économiques et performantiels pour le scénario 3	152
9.6.3.Eléments d'investissement spécifiques au scénario 3	156
10. Phase 2 : Synthèse technico-économique des trois scénarios.....	157
10.1. DISCUSSION : APPOINT THERMIQUE POUR LA CLIMATISATION.....	159
10.1.1. Présentation : Appoints centralisés et hybridation.....	159
10.1.2. Appoint frigorifique par machinerie centralisée	160
10.1.3. Synthèse comparative des trois scénarios et de l'Appoint centralisé.....	162
10.1.4. Appoint par approvisionnement d'énergie fatale frigorifique.....	163
11. Synthèse résumée des résultats de l'étude	165
11.1. DESCRIPTIF SOMMAIRE.....	165
11.2. BILAN SYNTHETIQUE DES TROIS SCENARIOS.....	167
11.2.1. Demande thermique du bâti et phasage des constructions.....	167
11.2.2. Représentations schématique des trois Scénarios, respectivement 1, 2 et 3	168
11.2.3. Bilans estimatifs pour le scénario 1 (pas de temps mensuel).....	169
11.2.4. Bilans estimatifs pour le scénario 2 (pas de temps mensuel).....	170
11.2.5. Bilans estimatifs pour le scénario 3 (pas de temps mensuel).....	172
11.3. SYNTHESE TECHNICO-ECONOMIQUE ESTIMATIVE.....	173

11.3.1. Comparatif des 3 scénarios (avec climatisation réduite) et de la solution classique	173
11.3.2. Comparatif des 3 scénarios et d'un appoint centralisé pour la climatisation	174
12. Conclusions.....	175

Liste des figures

Figure 1 : Schéma logique des options technologiques identifiées par l'étude	5
Figure 2 : Log thermique de 2013 dans le Puits Y (rapport BRGM/RP-63559) et profil thermique conforme aux relevés de 1965 et calculé pour un gradient géothermique de 0.02°C/m	6
Figure 3 : Exemple de profil thermique dans un puits de mine, Puits Hermann 1, Ruhr (source : Reichart, 2015)	25
Figure 4 : projet d'aménagement de la Zac Morandat	27
Figure 5 : Tableau des susfaces à construire sur la ZA Morandat – hypothèse médiane	29
Figure 6 : Principe de la technique géothermique en boucle ouverte dite "PACP" (puits à colonne permanente)	31
Figure 7 : Schéma de principe des ouvrages géothermiques de type PACP (Source Croteau, 2011)	32
Figure 8 : Dimensions typiques d'un ouvrage de type PACP (Source ASHRAE, 2002).....	32
Figure 9 : Principe de la technique géothermique en boucle fermée dite "Simple U"	33
Figure 10 : Détails d'une sonde géothermique profonde Double-U - Rehau-HPR	34
Figure 11 : Photographie du sonde géothermique Rehau-HPR avant mise en place	35
Figure 12 : Principe de la technique géothermique en boucle fermée dite « Simple U"	36
Figure 13 : Détails d'une sonde géothermique profonde Coaxiale et comparaison avec une sonde Double-U de puissance thermique similaire (Source : Rehau-HPR)	37
Figure 14 : Vue du touret où est enroulé une sonde coaxiale en PEHD-Xa de 450 m de profondeur et 90 mm de diamètre (Source Rehau, Projet Zumikon, Suisse)	38
Figure 15 : Coupe technique de la sondes de Weissbad dans le canton d'Appenzell en Suisse et dont la profondeur est proche de celle du Puits Y	38
Figure 16 : Représentation schématique d'une sonde géothermique profonde implantée dans un milieu rocheux et de ses performances (Source BRGM, 2015).....	39
Figure 17 : Allure indicative des variations du COP et de l'EER en fonction de la température de la ressource géothermique.....	42
Figure 18 : Indication de favorabilité de la ressource au regard des possibles usages thermiques.....	43
Figure 19 : Représentation schématique d'un réseau de chaleur géothermique en boucle tempérée et pompes à chaleur distribuées (Source BRGM).....	44
Figure 20 : Schéma de principe d'un réseau géothermique en boucle tempérée '2 tubes' En haut : Usage unique pour le chauffage – En bas : Usage mixte pour du chauffage et du rafraîchissement (Source BRGM)	45
Figure 21 : Schéma de principe d'un réseau géothermique en boucle tempérée "4 tubes" ; les deux tubes tièdes pouvant être confondus pour former un réseau "3 tubes" (Source BRGM)	46
Figure 22 : Solutions géothermiques envisagées par le bureau d'étude BG	47

Figure 23 : Estimation de la température initiale non-perturbée des roches au droit du Puits Y sur la base d'un gradient géothermique de 0.02°C/m déduit des sondages de 1965.	49
Figure 24 : Schéma d'implantation du réseau en boucle tempérée pour la distribution de l'énergie thermique du Fort d'Issy (Source : DALKIA Ile de France)	53
Figure 25 : Schéma de principe du réseau en boucle tempérée sur doublet géothermique à l'Albien pour la fourniture d'eau chaude au Fort d'Issy (source Dalkia Ile de France).....	55
Figure 26 : Quelques exemples de stockages de type TTES et PTES.....	56
Figure 27 : Coupe schématique du stockage de 75 000 m³ implanté à Marstal, Danemark (2012).....	57
Figure 28 : Photographie du chantier de réalisation du stockage de Marstal, Danemark (2011)	57
Figure 29 : Schéma logique du fonctionnement du stockage de Marstal pouvant atteindre 80°C en partie haute	58
Figure 30 : Températures dans le stockage de Marstal (Danemark) la deuxième année après la mise en service.....	58
Figure 31 : Quelques exemples de stockages géothermiques de type BTES et ATES	59
Figure 32 : Coûts d'investissement indicatif pour les quatre principales technologies de référence fonction du volume de stockage équivalent en eau	60
Figure 33 : Grandeurs comparatives pour les quatre technologies de stockage de référence.....	60
Figure 34 : Schéma logique du champ de sondes géothermiques, de la boucle tempérée et des organes de commandes pour le site du Campus Airbus à Blagnac	61
Figure 35 : Répartition indifférenciée des sondes dans les 3 volumes du champ de sondes sur le site du Campus Airbus à Blagnac	61
Figure 36 : Différentes configurations possibles dans le Puits Y, par ordre de complexité 'a priori'	63
Figure 37 : Données météorologiques de la station de Marignane et corrections dues à l'altitude pour Gardanne.....	70
Figure 38 : Répartition des demandes énergétiques sur une année	70
Figure 39 : Synthèse des surfaces de plancher <i>a minima</i> et par tranche de construction de la ZA Morandat.....	71
Figure 40 : Demandes énergétiques annuelles spécifiques, exprimées en énergie utile, retenues pour constituer la solution de référence	71
Figure 41 : Morphologie retenue en référence pour le réseau de la ZA Morandat	72
Figure 42 : Exemple de machinerie thermodynamique adaptée aux réseaux en boucle tempérée (Source : Campus Airbus à Blagnac)	73
Figure 43 : Exemple de temps de fonctionnement au régime nominal pour la ZA Morandat	74
Figure 44 : Caractéristiques indicatives de la configuration A) d'aménagement du Puits Y	75
Figure 45 : Résultats pour le système de référence en raccordant l'ensemble de la ZA Morandat	78
Figure 46 : Indicateurs de performance pour le système de référence non optimisé	78
Figure 47 : Performances thermiques atteintes sur la ZA Morandat en ne raccordant pas pour de la climatisation les bâtiments rénovés.....	81
Figure 48 : Performances thermiques atteintes sur la ZA Morandat en diminuant la demande en climatisation de tous les locaux	83
Figure 49 : Tableau des surfaces à construire sur la ZA Morandat – hypothèse maximale	85
Figure 50 : Caractéristiques du fonctionnement pour les surfaces portées à 65 500 m² par l'ajout de locaux en rafraîchissement direct	87

Figure 51 : Caractéristiques du fonctionnement pour le cas d'une surface totale de 65 500 m ² optimisant le rafraîchissement direct et la climatisation	89
Figure 52 : Illustration du déséquilibre apparaissant lorsque le Centre Multi-Culturel n'est plus raccordé	91
Figure 53 : Comparaison des profils de température recherchés pour les configurations B) et C) vis-à-vis de la configuration A) de référence.	94
Figure 54 : Cycles thermiques saisonniers théoriques des configurations A), B) et C)	95
Figure 55 : Réseau 3 ou 4 tubes envisageable pour les configurations B) et C) – Pompes non représentées (Source BRGM, 2015)	96
Figure 56 : Rappel des Indicateurs de performance pour le système comportant 65 500 m ² raccordés, dont 17 000 m ² en rafraîchissement direct	97
Figure 57 : Indicateurs de performances envisageables avec la configuration B)	98
Figure 58 : Schémas descriptifs de la configuration D) avec équipement de type sonde coaxiale	101
Figure 59 : Schémas descriptifs de la configuration D) avec équipement de type PACP	102
Figure 60 : Vue du champ solaire et du stockage en cours de construction à Marstal, Danemark	104
Figure 61 : Schéma logique de l'installation de stockage de Dronninglund, Danemark	105
Figure 62 : Vue du champ solaire et du stockage de Dronninglund, Danemark	105
Figure 63 : Exemple de simulation des demandes en énergie thermique et de la température du stock – cas d'une température initiale de 60°C	109
Figure 64 : Autre exemple de simulation des demandes en énergie thermique et de la température du stock – cas d'une température initiale de 30 °C	110
Figure 65 : Energies et puissances en jeu dans le Puits Y	111
Figure 66 : Comparaison de la climatisation (en haut) et du rafraîchissement direct (en bas) pour la technique du champ de sondes	114
Figure 67 : Représentation de l'installation de Crailsheim recourant à un champ de sondes stockant l'énergie thermique de panneaux solaires	115
Figure 68 : Puits_Y ; Technologie de référence - Stockage alterné et Boucle tempérée	117
Figure 69 : Puits_Y ; Technologie alternative - Stockage chaud et Réseau de chaleur	118
Figure 70 : Principes techniques pour échanger de la chaleur dans le Puits Y	119
Figure 71 : Configuration A) – Configuration de base sans aménagement dans le Puits Y	120
Figure 72 : Configuration B) – Configuration avec obturateur semi étanche fixe dans le Puits Y	120
Figure 73 : Configuration C) – Configuration avec obturateur semi étanche mobile dans le Puits Y	121
Figure 74 : Configuration D) – Configuration avec obturateur étanche fixe dans le Puits Y	121
Figure 75 : Champ de sondes ; Technologie de référence - Stockage alterné et boucle tempérée	122
Figure 76 : Champ de sondes ; Technologie alternative - Stockage chaud et réseau de chaleur	122
Figure 77 : Schéma logique des options technologiques identifiées par l'étude	126
Figure 78 : Schéma logique des scénarios technologiques retenus par le Comité de Pilotage	136
Figure 79 : Plan masse de la ZA Morandat et des tranches d'aménagement	139
Figure 80 : Scénario 1 - Stockage équilibré dans le Puits_Y et distribution en boucle tempérée	140
Figure 81 : Indicateurs de performance du scénario 1 durant les 5 premières années	142
Figure 82 : Simulation du fonctionnement thermique pour le scénario 1 les 5 premières années	142

Figure 83 : Scénario 1 - Puissances d'échange thermique avec le Puits Y et débits afférents	143
Figure 84 : Bilan énergétique indicatif pour le scénario 1 pour la cinquième année.....	144
Figure 85 : Scénario 2 -Stockage chaud dans le Puits Y et distribution en réseau de chaleur	146
Figure 86 : Simulation simplifiée du fonctionnement thermique pour le scénario 2 les 5 premières années	148
Figure 87 : Bilan énergétique indicatif pour le scénario 2 pour la cinquième année.....	149
Figure 88 : Prix indicatif d'un système de climatisation solaire (Source : Solarnext / Solem Consulting, 2011)	150
Figure 89 : Scénario 3 - Champ de sondes géothermiques et distribution en boucle tempérée	151
Figure 90 : Indicateurs de performance du scénario 3 durant les 5 premières années.....	153
Figure 91 : Simulation du fonctionnement thermique pour le scénario 3 les 5 premières années	153
Figure 92 : Scénario 3 - Puissances d'échange thermique avec le champ de sondes et débits afférents.....	154
Figure 93 : Bilan énergétique indicatif pour le scénario 3 pour la cinquième année.....	155
Figure 94 : Tableau de synthèse technico-économique des trois scénarios	157
Figure 95 : Tableau technico-économique comparatif des trois scénarios et de la solution classique ...	158
Figure 96 : Représentation schématiques des scénarios 1 et 3 en présence d'un appoint solaire thermique et frigorifique par machine à sorption (sur solaire thermique).....	161
Figure 97 : Tableau technico-économique comparatif des trois scénarios et de l'appoint	162
Figure 98 : Localisation des tranches prévisionnelles d'aménagement.....	181
Figure 99 : Topographie de la ZA Morandat et possibles constructions	182
Figure 100 : Délimitation des tranches d'aménagement et des possibles constructions.....	183
Figure 101 : Localisations géographiques des Puits de mine (source BRGM/DPSM)	187
Figure 102 : Positionnement des recetes dans le Puits Y (source BRGM/DPSM)	188
Figure 103 : Schéma du fonctionnement hydrologique de la mine pendant l'exploitation (source BRGM/DPSM)	189
Figure 104 : Schéma du fonctionnement hydrologique de la mine post-exploitation (source BRGM/DPSM)	190

Liste des tableaux

Tableau 1 : Calcul indicatif des ordres de grandeur de l'énergie et de la puissance thermique qui seraient accessibles dans le Puits Y.	50
Tableau 2 : Demandes annuelles spécifiques en énergie utile – Hypothèses de référence	76
Tableau 3 : Demandes annuelles cumulées en énergie utile – Hypothèses de références	77
Tableau 4 : Constat de déséquilibre des échanges thermiques à cinq ans.....	77
Tableau 5 : Demandes annuelles spécifiques pour le cas où les bâtiments rénovés ne sont pas raccordés pour du rafraichissement ou de la climatisation	80
Tableau 6 : Demandes annuelles cumulées en énergie utile pour le cas où les bâtiments rénovés ne sont pas raccordés pour du rafraichissement ou de la climatisation.....	80

Tableau 7 : Comparaison des demandes géothermiques du système de référence et du cas où les bâtiments rénovés ne sont pas raccordés pour le rafraîchissement	80
Tableau 8 : Demandes annuelles spécifiques pour le cas où la performance en climatisation des bâtiment neuf est améliorée de l'ordre de 20%	82
Tableau 9 : Demandes annuelles cumulées en énergie utile pour le cas où la performance en climatisation des bâtiment neuf est améliorée de l'ordre de 20%	82
Tableau 10 : Comparaison des demandes géothermiques du système de référence et du cas où la performance en climatisation des bâtiments neufs est améliorée de l'ordre de 20%	82
Tableau 11 : Demandes annuelles spécifiques en énergies utiles – Hypothèses de référence.....	84
Tableau 12 : Demandes annuelles cumulées en énergie utile pour le cas d'une surface portée à près de 65 500 m ² par l'ajout de locaux en rafraîchissement direct	86
Tableau 13 : Comparaison des demandes géothermiques du système de référence et du cas où les surfaces sont portées à 65 500 m ² par ajout de locaux en rafraîchissement direct.	86
Tableau 14 : Demandes annuelles spécifiques en énergies utiles pour le cas de 65 500 m ² optimisant le rafraîchissement direct et la climatisation.....	88
Tableau 15 : Demandes annuelles cumulées, exprimées en énergie utiles pour le cas de 65 500 m ² optimisant le rafraîchissement direct et la climatisation.....	88
Tableau 16 : Comparaison des demandes géothermiques du système de référence et du cas de 65 500 m ² optimisant le rafraîchissement direct et la climatisation	88
Tableau 17 : Demandes annuelles cumulées, exprimées en énergie utiles pour le cas de 57 500 m ² de bâtiments neufs mixant rafraîchissement direct et climatisation.....	90
Tableau 18 : Comparaison des demandes géothermiques du système de référence et du cas portant sur 57 500 m ² de bâtiments neufs	90
Tableau 19 : Echanges thermiques saisonniers avec le Puits Y sur 5 ans Comparaisons des la Configuratio A avec la configuration B)	99
Tableau 20 : Demandes annuelles spécifiques en énergies utiles	106
Tableau 21 : Demandes annuelles cumulées, exprimées pour le cas de 65 500 m ²	107
Tableau 22 : Hypothèses empiriques pour estimer les surfaces de panneaux solaires.....	108
Tableau 23 : Rayonnement solaire incident sur le secteur de Gardanne et estimation des productions d'énergie thermique couvrant les besoins de la ZA Morandat.....	108
Tableau 24 : Tableau synthétique des conditions de l'examen des trois scénarios	137
Tableau 25 : Hypothèses d'implantation pour un réseau de chaleur (Source Ademe/Perdurance, 2009)	138
Tableau 26 : Coûts d'investissement spécifiques pour le scénario 1.....	145

Liste des annexes

Annexe 1 : Vues du secteur d'aménagement de la ZA Morandat.....	179
Annexe 2 : Eléments de contexte liés à l'ancienne mine	185
Annexe 3 : Fiche Secteur Clé N°3 : ZAC Morandat (source : bureau d'étude BG, mars 2014)	191
Annexe 4 : Compléments pour esquisser une fiche selon le formalisme des aides de l'ADEME	197
Annexe 5 : Compléments relatifs aux machines à sorption	207

1. Contexte et objectifs

La mission technique confiée au BRGM avait explicitement à traiter quatre éléments de mission tels qu'exprimés par le programme prévisionnel initial reproduit ci-dessous :

1. Examen des techniques disponibles qui seraient applicables

Il s'agit en cela d'établir un examen critique des solutions techniques imaginées et/ou employées pour exploiter les installations minières souterraines à des fins thermiques. L'examen sera conduit au travers de la bibliographie disponible à la date de réalisation de l'étude et sera focalisé sur les solutions applicables aux puits de mines ennoyés.

L'examen critique sera illustré par les éléments de bibliographie pertinents et un avis relatif à l'état d'avancement de la solution.

Le cas échéant, il en sera de même pour les éventuelles autres possibilités d'utilisation du Puits Y. Morandat qui viendraient à être identifiées.

Cette tâche sera concrétisée par la sélection des solutions techniques applicables au cas de Gardanne ; une réunion de travail R1 avec le donneur d'ordre étant prévue à cet effet.

Le programme qui suit est donc prévisionnel étant, de fait, conditionné par la sélection ci-dessus.

2. Examen des cycles de demande thermique sur le secteur d'étude

Le secteur de Gardanne est localisé dans une région de France où les besoins en chauffage et en rafraichissement peuvent être déséquilibrés ; les usages à des fins de climatisation et de rafraichissement direct pouvant être largement prédominants, par exemple si la part de locaux tertiaires ou commerciaux raccordés était très importante. Dans ce contexte, le travail consistera à convenir avec le donneur d'ordre d'un scénario de demandes thermiques réaliste au regard des opportunités offertes par le Puits Y-Morandat. On rappelle en particulier que la température de l'eau disponible naturellement en profondeur dans le puits est, a priori, plus propice à du chauffage qu'à du rafraichissement.

Cette tâche aura pour objet prioritaire la formalisation d'un cycle de demande thermique qui sera représenté par les demandes thermiques du tissu bâti :

- Les demandes thermiques mensuelles exprimées en kWh pour :
 - Le chauffage
 - La production de l'eau chaude sanitaire (ECS)
 - Le rafraichissement direct
 - La climatisation
- Les demandes ci-dessus distingueront, si possible, les types de bâti suivants dont seules seront retenues les surfaces cumulées qui seront exprimées en m² SHON :
 - Cumul SHON des bâtiments d'habitation
 - Cumul SHON des bâtiments tertiaires et commerciaux
 - Cumul SHON des bâtiments hôteliers et de santé
 - Cumul SHON des locaux à usage saisonnier (enseignement, centre de loisir ...)
- Les demandes globales hebdomadaires et mensuelles seront reconstituées en supposant que les cycles météorologiques annuels de la température peuvent être représentés par une sinusoïde.

3. Esquisse sommaire d'un ou plusieurs dispositif(s) souterrain(s) envisageable(s)

Ce travail ne peut intervenir avant que les deux tâches ci-dessus n'aient été suffisamment avancées et que soient donc estimées les quantités d'énergie thermique pour chacun des usages envisagés à Gardanne. Il s'agira d'esquisser un ou plusieurs dispositif(s) souterrain(s), localisés dans le Puits Y. Morandat ayant la capacité de satisfaire les besoins thermiques tels que convenu avec le donneur d'ordre. Celui-ci s'engage à communiquer les informations utiles et suffisantes relatifs à l'estimation desdits besoins.

De manière prévisionnelle, on prévoit d'envisager deux dispositifs géothermiques, le premier selon une approche en boucle ouverte et le second selon une approche en boucle fermée.

Dans les deux cas, la difficulté technique est d'appréhender comment maîtriser les échanges thermiques, qui s'opèrent naturellement ou de façon pilotée dans la direction verticale, ce qui relèvera des études de détail mais on prévoit de lister les orientations techniques identifiées.

Le cas échéant, on envisage d'esquisser une troisième solution variante qui combine en un même dispositif les approches en boucle ouverte et en boucle fermée.

Cette tâche proposera, pour chacune des solutions qui seront retenues, une esquisse très sommaire de la complétion indicative, c'est-à-dire de l'équipement du puits pour que la solution soit opérationnelle, y compris les recommandations pour la maîtrise des éventuelles circulations parasites. Cet équipement sera caractérisé par les informations qui sont nécessaires à l'estimation sommaire de la réponse thermique du puits.

4. Estimation sommaire de la réponse thermique du puits Y. Morandat

Cette estimation s'entend pour une sollicitation thermique qui correspond aux cycles de demandes thermiques estimées pour le secteur (élément de mission 2) et fonction du système souterrain considéré (élément de mission 3).

Ce travail consiste à calculer, par semaine ou par mois, les quantités d'énergie thermique qui sont échangées avec le puits (eau du puits et formations géologiques alentour). Il s'agit en cela d'estimer sommairement les variations de la température de ces volumes de matière et donc d'exprimer comment peut fluctuer l'état des stocks thermiques.

Nota : A ce niveau d'étude et de manière prévisionnelle, le pas de temps hebdomadaire semble devoir être préféré comme étant un bon compromis entre durée du calcul et finesse des résultats. La précision des résultats reste largement conditionnée par l'imprécision des hypothèses à ce point d'avancement des études. Le calcul sera néanmoins conduit pour 10 années consécutives à partir de l'état zéro estimé ; le but étant de vérifier qu'il n'y a pas de dérive anormale dans un sens ou dans l'autre (réchauffement ou refroidissement) et, le cas échéant, d'ajuster les dimensions des équipements techniques ou des stocks thermiques dans le puits.

Cette tâche se concrétisera par :

- Une proposition de représentation très schématique du système thermique apte à décrire toutes les solutions esquissées dans les éléments des missions 2 à 4 ci-dessus). *A priori*, ce système devrait être composé :
 - de ballons tampons, qui ne seront pas décrits, dont la fonction est de parfaitement lisser, à l'échelle de l'ensemble du tissu bâti raccordé toutes les fluctuations sur une journée, voire une semaine. Pour la présente étude, cet équipement n'est cité que pour mémoire mais il représente une composante essentielle au niveau des études de détail car il conditionne les puissances installées des équipements à descendre dans le puits.

- des moyens thermodynamiques centralisés aptes à produire, pour la température souhaitée, les quantités d'énergie correspondant aux demandes ci-dessus. On conviendra avec le donneur d'ordre de ne retenir qu'un seul des deux schémas ci-dessous :
 - a) Moyens indépendants pour chacune des quatre demandes – Ce schéma tend à maximiser les débits de fluide caloporteur dans les équipements souterrains mais, par exemple, il peut se justifier dans le cas de la solution variante combinant les solutions en boucles ouverte et fermée ou dans le cas de stocks thermiques aménagés à différentes profondeurs dans le puits.
 - b) Moyen unique de type thermo-frigo-pompe – Ce schéma tend à minimiser les débits de fluide caloporteur dans les équipements souterrains.

Dans tous les cas, les moyens thermodynamiques seront uniquement décrits par leur performance énergétique globale, c'est-à-dire la consommation d'électricité et la production d'énergie thermique. De manière prévisionnelle et afin de faciliter les comparaisons, on choisira une performance simple bien que réaliste, par exemple COP=4 et EER=4. On prévoit de ne pas prendre en considération la variation de performance en fonction de la température tant que cette variation ne dépasse pas 10 °C de part et d'autre de la température moyenne du volume considéré durant un cycle annuel.

- Une restitution sommaire des comportements thermiques de différentes zones de profondeur du puits ; cela sur les 10 cycles annuels successifs
- Une restitution estimative des consommations électriques de la machinerie thermodynamique et des systèmes de circulation de fluide caloporteur dans le puits ; cela pour les 10 cycles annuels.
- Une comparaison estimative avec un système thermodynamique conventionnel fonctionnant sur le principe du doublet géothermique sur nappe aquifère à 50 m de profondeur et qui aurait fourni le même service.

2. Phase 1 : Examen initial du contexte

2.1. SPECIFICITE DU CONTEXTE

Du fait de ses dimensions, notamment son grand diamètre (10 m) et sa grande hauteur (1 100 m), le Puits Y à Gardanne fait l'objet d'une interrogation quant à son utilisation à des fins géothermiques. En effet, le volume ennoyé est important et l'eau présente une capacité thermique volumique pratiquement double de celle des roches.

Pourtant, ses caractéristiques géométriques et hydrologiques font qu'aucune des solutions du domaine de la géothermie n'est directement transposable tant du point de vue du mode d'exploitation que du point de vue des équipements à mettre en œuvre. Par exemple, le puits n'est que partiellement ennoyé ; ce qui peut compliquer la gestion des efforts liés à la pression dans les tubages puisqu'il n'y a pas de compensation résultant de la pression de l'eau à l'extérieur.

De plus, l'équipement des parois du puits n'a pas été démantelé lors de la fermeture ; ce qui peut compliquer la mise en place des équipements thermiques.

Certes, des solutions techniques semblent pouvoir être adaptées, y compris dans le domaine de la géothermie mais, outre le fait qu'elles ne coïncident pas nécessairement avec l'équipement qu'il faudrait prévoir pour les puissances géothermiques en jeu devant satisfaire les besoins thermiques qu'il est envisagé de satisfaire en surface, des contraintes techniques peuvent être à prendre en considération.

Par exemple, si l'on reprend l'illustration ci-dessus de l'ennoiement incomplet du puits, la pression différentielle qui résulterait d'une colonne d'eau additionnelle de 300 m de hauteur dans les tubages se répercuterait jusqu'au fond de l'ouvrage (1 100 m). De ce fait, certains matériaux synthétiques employés en géothermie pourraient ne pas avoir la capacité de résister durablement et sont à exclure par précaution, par exemple en raison de la difficulté à obtenir la garantie du constructeur.

On perçoit donc au travers de ce qui précède que l'équipement géothermique du Puits Y nécessitera assez probablement une conception spécifique, cela même s'il y a évidemment possibilité d'utiliser des composants conventionnels.

De plus, la question traitée impose de considérer, pour la solution de base, que l'intégralité des équipements géothermiques souterrains doit rester confinée dans le Puits Y lui-même ; ce qui signifie par exemple que la solution classique du doublet géothermique n'est pas directement applicable.

Par ailleurs, le Puit-Y est localisé dans le vaste complexe d'une ancienne exploitation minière se caractérisant :

1. Par des niveaux bas de la température actuellement mesurée en profondeur dans les roches et l'eau des puits et galeries, qui résultent d'abord de l'exploitation minière antérieure qui imposait une ventilation puis des eaux d'ennoiement dont le niveau de la température était significativement plus bas que la température historique des roches.

De fait, en 2013, la température annoncée en partie basse du Puits Y était de l'ordre de 26°C à 28°C alors qu'une valeur au-delà de 36°C à 38°C serait représentative de la température initiale avant l'exploitation de la mine.

2. Par un réseau de galeries et drains interconnectés qui sont le siège d'importants écoulements ; plus particulièrement en période de pluie. De ce fait, il y a nécessité d'opérer

un pompage permanent à l'exhaure de la mine qui a pour objet de maintenir un vide sécuritaire en prévision des périodes de pluie. Ce niveau est maintenu aux alentours de -40 m NGF à -50 m NGF via un pompage opéré dans le Puits Gérard (Mimet) situé à environ 4 km au Sud-Est du Puits Y. Le débit du pompage est de l'ordre de 1 000 m³/h et peut atteindre 1 200 m³/h.

Dans ce contexte, la présente mission d'étude s'attache à décrire les solutions techniques, du domaine de la géothermie, qui peuvent raisonnablement être envisagées ; cela dans l'hypothèse où l'utilisation en surface concerne une zone d'activité dont la surface SHON indicative serait à terme de l'ordre de 80 000 m² au maximum.

2.2. PARTICULARITES DE LA RESSOURCE THERMIQUE DU PUITS Y

Un puits de mine ennoyé est le siège de phénomènes physiques et thermiques, et parfois chimiques, qui contraignent la température, notamment sur son profil vertical comme on peut le constater dans l'exemple en Figure 3 se rapportant au Puits-Hermann 1 du secteur des mines de charbon du Nord de la Ruhr.

Ainsi, d'une manière générale, la température de la colonne d'eau dans un puits a tendance à être globalement homogène et à s'établir à une valeur proche de la valeur moyenne des roches sur la hauteur de l'ouvrage.

Dans le cas du Puits Y, cette température moyenne est actuellement de l'ordre de 28°C à 30 °C ; cela alors que la température initiale non perturbée des roches à la profondeur du Puits Y était probablement au-delà de 40 °C, voire de 45 °C.

Ce constat est valable pour tous les puits ennoyés, y compris pour les puits relativement isolés du point de vue hydraulique (dits puits aveugles, comme c'est précisément le cas du Puits Y). On peut d'ailleurs noter que, pour un puits de mine aveugle, la salinité tend également à s'homogénéiser sur toute la hauteur du puits.

Pour être complet, il existe une influence de la température des parois se traduisant par une légère augmentation de la température avec la profondeur, qui ne peut pas être totalement escamotée par les phénomènes de convection.

Dans le cas d'une exploitation de la ressource thermique d'un puits, il y a alors perturbation de la température. Or, si la température (ou la salinité) est perturbée en un point du puits, alors des boucles de convection s'organisent et tendent à résorber les différences. Ce sont des phénomènes relativement rapides et on peut constater ainsi des vitesses de l'ordre de 0,1 m/s à la périphérie des boucles de convection ; lesquelles ont typiquement des dimensions de l'ordre du diamètre du puits.

A retenir : Sauf à segmenter le Puits Y en plusieurs tronçons, la température dans le puits tendra toujours à s'homogénéiser rapidement.

On notera par ailleurs que si la température du puits au fil des cycles d'exploitation varie relativement peu autour de la température naturelle des roches, typiquement de l'ordre d'une quinzaine de degrés, alors l'influence des parois restera assez limitée. Ainsi, on peut admettre que seuls les 4 à 5 premiers mètres sont impactés lors des cycles saisonniers, en particulier si les besoins pour le chauffage et pour la climatisation sont relativement équilibrés ; ce qui correspond aux objectifs à atteindre pour les besoins à raccorder au Puits Y.

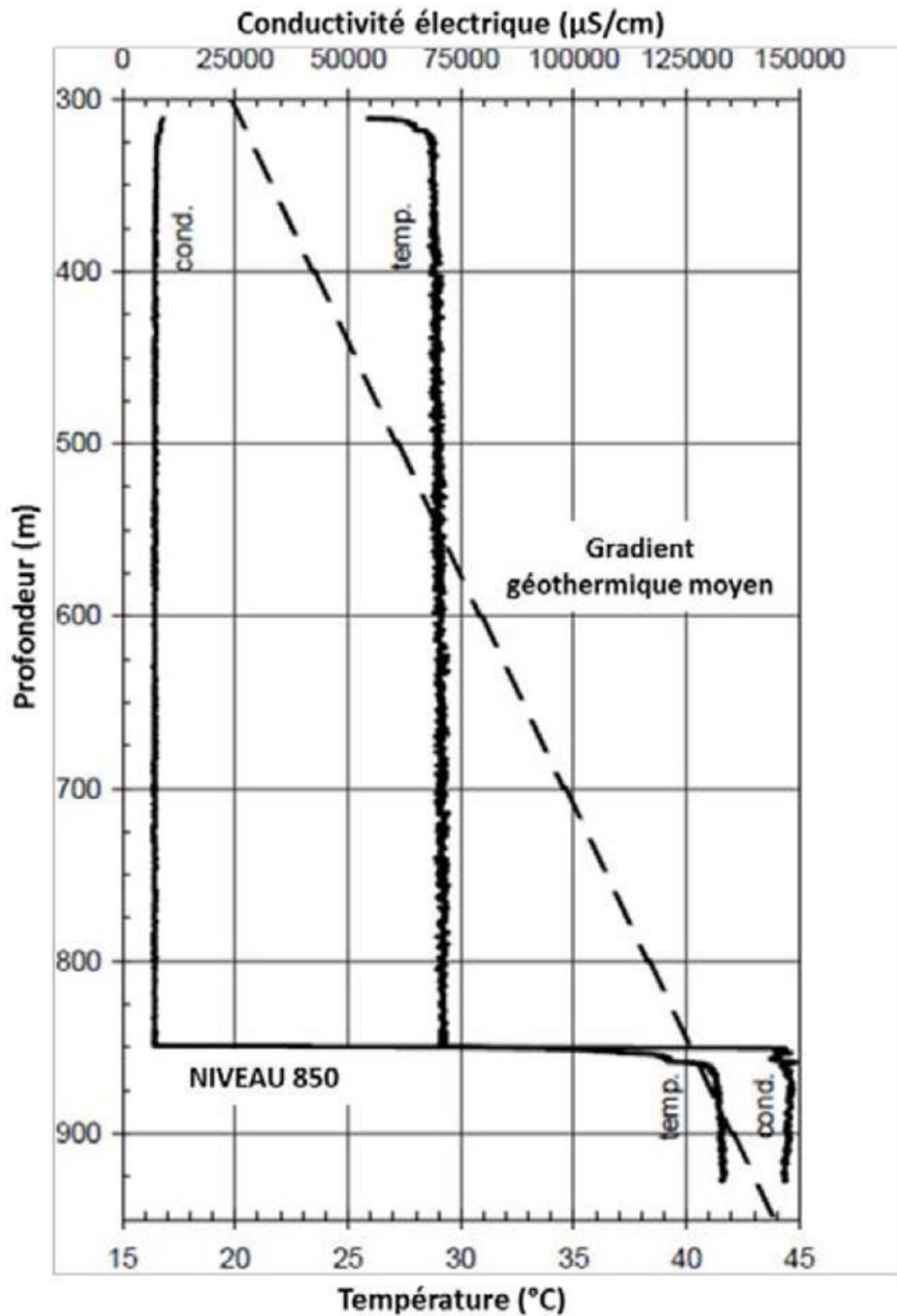


Figure 3 : Exemple de profil thermique dans un puits de mine, Puits Hermann 1, Ruhr (source : Reichart, 2015)

2.3. PARTICULARITES DES BESOINS THERMIQUES EN SURFACE

2.3.1. Objectifs et contraintes

Les besoins thermiques en surface sont et seront globalement ceux constatés pour le confort thermique d'utilisations dans le domaine tertiaire.

Pour ce mode d'utilisation, du fait de la localisation géographique, les besoins pour le rafraîchissement peuvent excéder les besoins pour le chauffage mais on préférera retenir qu'il y a possibilité d'approcher l'équilibre entre les demandes estivales pour le rafraîchissement et les demandes hivernales pour le chauffage.

Dans un tel contexte, il est légitime de se poser la question de l'optimisation technico-économique du système géothermique. Il y a pour cela deux leviers principaux :

- Privilégier les ressources géothermiques dont la température est la plus proche possible des besoins

Dans le cas de l'utilisation du Puits Y, cela signifie concrètement qu'il peut être envisagé de constituer des tronçons peu dépendants les uns des autres. Par exemple, à terme, un tronçon de -700 m à -1 100 m pourrait avoir une température en équilibre avec les roches comprise entre 36°C et 38°C alors qu'un tronçon situé entre -300 m et -700 m pourrait s'équilibrer entre 24°C et 26°C.

- Minimiser les puissances installées en effaçant les pointes de consommation qui sont consommatrices d'électricité à coût élevé

Dans le cas des installations envisagées, cela peut signifier que des réservoirs tampon à la température souhaitée par les usagers peuvent être prévus le long des réseaux d'énergie. Cela peut également signifier que sont constitués des stocks géothermiques à la bonne température pour un usage direct par l'utilisateur final. On pourra par exemple considérer qu'un stock chaud à 30-35 °C est adéquat pour du chauffage ou qu'un stock frais à 15-20 °C peut être employé pour du rafraîchissement des locaux, c'est-à-dire sans recourir à un groupe froid.

2.3.2. Demandes annuelles en énergie thermique

Sur le secteur de la ZA Morandat (dont le projet d'aménagement est porté en Figure 4 ci-dessous), le bureau d'étude BG propose de retenir les valeurs suivantes pour les demandes en énergie thermique, que nous proposons à ce stade de retenir comme étant de l'énergie finale :

	Bâtiments rénovés	Bâtiments neufs
Chauffage	40 kWh/m ² .an	20 kWh/m ² .an
ECS	5 kWh/m ² .an	5 kWh/m ² .an
Climatisation	50 kWh/m ² .an	25 kWh/m ² .an

A noter que la distinction entre le rafraîchissement direct (freecooling) et la climatisation n'est pas proposée par le bureau d'étude BG (voir fiche en annexe). Si la température de la ressource le permet, alors cette solution est envisageable pour satisfaire des demandes en rafraîchissement 4 à 5 fois plus faibles que pour des locaux climatisés. C'est typiquement le cas pour des logements.

	Bâtiments rénovés	Bâtiments neufs
Rafraîchissement direct	10 kWh/m ² .an	5 kWh/m ² .an

Ces valeurs seront appliquées à trois tranches de construction pour les bâtiments indiqués dans le tableau reporté en Figure 5 (p. 29).

2.3.3. Aménagement de référence pour la ZA Morandat

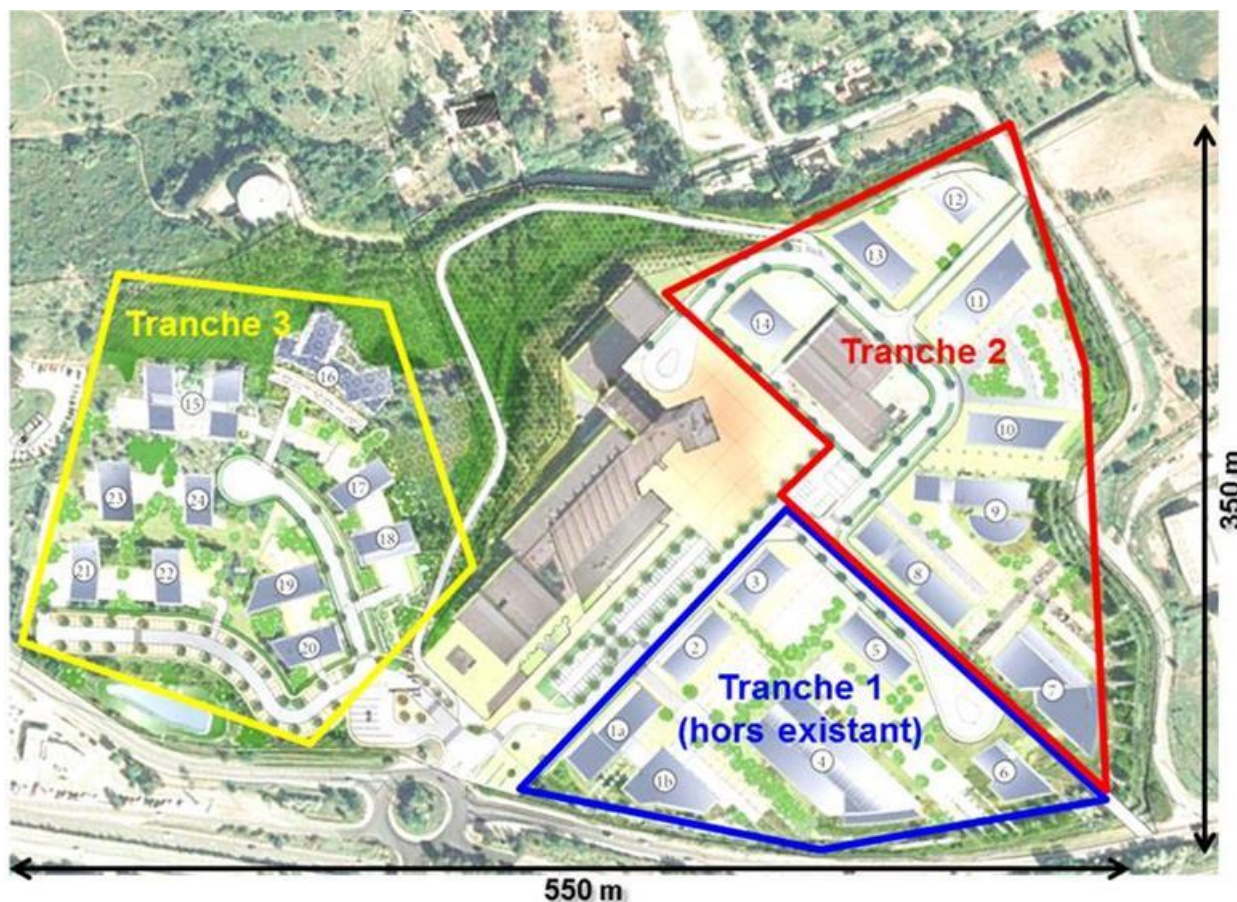


Figure 4 : projet d'aménagement de la Zac Morandat

Selon les premières informations collectées, l'aménagement du secteur du Puits Morandat avait fait l'objet d'une planification prévisionnelle en 3 tranches devant faire suite aux travaux envisagés pour les premières livraisons courant 2017 :

- Existant : BRGM + hôtel d'entreprises + SEMAG et services de la ville
- 2018-2019 : livraison des bâtiments de la tranche 1 (bâtiments 1 à 6)
- 2019-2020 : livraison des bâtiments de la tranche 2 (bâtiments 7 à 14)
- 2020-2021 : livraison des bâtiments de la tranche 3 + CCSTI (bâtiments 15 à 24)

Le Centre Culture Scientifique Technique et industriel (CCSTI), dont la surface est estimée à hauteur de 4 500 m² complètera la rénovation de l'existant et devrait porter ainsi la surface rénovée à 8 000 m² environ.

Actuellement les surfaces rénovées sont les suivantes :

- Une surface de 2 420 m² pour laquelle les consommations ont été en 2014, en cumulé pour le chauffage et la climatisation, de l'ordre de 129 MWh/an et pour l'électricité de l'ordre de 143 MWh ; surface constituée :
 - D'un hôtel d'entreprise d'une superficie de 1 800 m² équipée d'un système de stockage journalier pour l'eau glacée de type CRISTOPIA,
 - Des bureaux de le SEMAG pour 620 m²,
- Des locaux occupés par BRGM / DPSM représentant :
 - Une surface pour les archives estimée à 700 m² (chauffage : 78 kW installés), dont 60 m² climatisés (7 kW installés) représentant 53 MWh/an électriques.
 - Une surface de 380 m² pour les bureaux représentant une consommation en 2014 de 14 MWh/an électriques (chauffage : 46 kW installés, climatisation : 41 kW installés).

Important : En l'état, les surfaces existantes ci-dessus ne peuvent pas être raccordées sans modifications importantes à un réseau d'énergie thermique.

2.3.4. Surfaces minimales envisagées sur la ZA Morandat

Selon les hypothèses reproduites dans le tableau figurant en Figure 5, les surfaces disponibles sur la ZA Morandat seront **a minima de l'ordre de 48 000 m²**, dont 8 000 m² en bâtiments rénovés.

Les nouvelles constructions devraient faire l'objet d'une décomposition en lots, jusqu'à une cinquantaine.

Dans la présente étude, on considèrera en hypothèse de base que les nouvelles constructions devraient porter **a minima** sur environ 40 000 m² de bâtiments neufs pour des activités tertiaires et économiques auxquelles il convient d'ajouter 8 000 m² de bâtiments rénovés ; 3 500 m² étant déjà rénovés et 4 500 m² restant à rénover. A noter que les 3 500 m² déjà rénovés doivent faire l'objet de travaux de modification de leurs équipements pour pouvoir être raccordés à un réseau d'énergie.

2.3.5. Surfaces maximale escomptées sur la ZA Morandat

Une réévaluation effectuée en 2014 envisage la construction de locaux neufs à hauteur de 57 512 m² au maximum, obtenus en aménageant un troisième niveau sur la majorité des bâtiments.

Dans la présente étude, on pourra donc considérer que la ZA Morandat sera constituée au maximum de 58 000 m² de nouvelles constructions affectées à des activités tertiaires et économiques auxquelles il convient d'ajouter à 8 000 m² de locaux rénovés, portant l'ensemble à **66 000 m² au maximum**.

VILLE DE GARDANNE

PUITS YVON MORANDAT

SEMAG

MAITRE D'OUVRAGE

ESTIMATION DES SURFACES DE PLANCHER A REALISER

ESTIMATION ETABLIE SELON PLAN DE MASSE PA9, ET HORS BATIMENTS EXISTANTS)

SECTEUR	BATIMENT	LINEAIRE	LARGEUR	Hypothèse 1 : 1 niveau		Hypothèse 2 : 2 niveaux		Hypothèse 3 : 2.5 niveaux		Hypothèse 4 : 3 niveaux					
				Nb de niv	Surface	Nb de niv	Surface	Nb de niv	Surface	Nb de niv	Surface				
EST	Tranche 1 (2 niveaux)	1a	52	16	1	832	2	1664	2.5	2080	3	2496			
		1b	40	22	1	880	2	1760	2.5	2200	3	2640			
		2	40	22	1	880	2	1760	2.5	2200	3	2640			
		3	30	16	1	480	2	960	2.5	1200	3	1440			
		4	70	35	1	2450	2	4900	2.5	6125	3	7350			
		5	40	16	1	640	2	1280	2.5	1600	3	1920			
	Tranche 2 (2 niveaux)	6	30	18	1	540	2	1080	2.5	1350	3	1620			
		7	60	28	1	1680	2	3360	2.5	4200	3	5040			
		8	65	16	1	1040	2	2080	2.5	2600	3	3120			
		9	75	14	1	1050	2	2100	2.5	2625	3	3150			
		10	45	16	1	720	2	1440	2.5	1800	3	2160			
		11	58	16	1	928	2	1856	2.5	2320	3	2784			
		12	24	16	1	384	2	768	2.5	960	3	1152			
		13	40	16	1	640	2	1280	2.5	1600	3	1920			
TOTAL SECTEUR EST				1	13656		27312		34140		40968				
OUEST	HAUTEURS PL : R+1 en amont et 7 m R+3 en aval et 15 m et 3ème niveau partiel sur un linéaire maxi de 25m RDC : dégagé et occupé à 20%	15	62	15	2.2	2046	Tranche 3 (2 niveaux)					Hypothèse 3è niveau partiel		2421	
		16	HOTEL			3500						avec 3ème niveau partiel		3500	
		17		15	2.2	990						avec 3ème niveau partiel		1365	
		18		15	2.2	924						avec 3ème niveau partiel		1299	
		19		15	2.2	1155						avec 3ème niveau partiel		1530	
		20		15	2.2	957						avec 3ème niveau partiel		1332	
		21		15	2.2	957						avec 3ème niveau partiel		1332	
		22		15	2.2	891						avec 3ème niveau partiel		1266	
		23		15	2.2	924						avec 3ème niveau partiel		1299	
		24		15	2.2	891						avec 3ème niveau partiel		1200	
TOTAL SECTEUR OUEST					13169						16544				
TOTAL SECTEURS OUEST ET EST												Hypothèse 3 Secteur Est + Secteur Ouest 3 niv.		47309	57512
Cumul												Hypothèse Secteur Est + Secteur Ouest base		47309	57512
Hypothèse 1 Secteur Est + Secteur Ouest base												Hypothèse 3 Secteur Est + Secteur Ouest 3 niv.		47309	57512

Figure 5 : Tableau des susrfaces à construire sur la ZA Morandat – hypothèse médiane

2.3.6. Problématique d'un éventuel data center

Sur le principe, l'éventualité de l'implantation d'un data center (DC) reste envisagée.

Dans un premier temps, le bureau d'étude BG avait évoqué des besoins spécifiques en climatisation à hauteur de 8 300 MWh par an ; ces besoins étant répartis sur pratiquement toute l'année.

IMPORTANT : En première approche, un tel équipement déséquilibrerait très significativement le bilan annuel des énergies thermiques à échanger avec le Puits Y, alternativement pour le chauffage et pour le rafraîchissement

En effet, les excédents du data center escomptés en hiver restent négligeables même s'ils peuvent paraître favorables puisqu'ils contribuent à satisfaire les besoins en chauffage des bâtiments alentour. Il en est de même pour les besoins en ECS.

Il est donc proposé dans la présente étude de d'abord regarder l'hypothèse d'un data center comme une variante du système de base.

Dans un second temps, il s'agira d'examiner les conditions pour gérer tout ou partie des besoins en climatisation d'un data center, c'est-à-dire des besoins supplémentaires en chauffage qu'il faut satisfaire pour compenser les excédents de chaleurs rejetés par ledit data center.

Par ailleurs, peut-être faut-il noter que des progrès sont actuellement constatés et attendus dans les technologies employées dans les data center, tant en termes de réduction significative des besoins en matière de rafraîchissement qu'en termes de technologies pouvant être employées pour assurer ledit rafraîchissement.

2.4. CONCLUSION PARTIELLE DU CHAPITRE

On retiendra que pour une hauteur de puits de mine donnée, isolée du point de vue hydrologique, alors la température tend à être homogène sur toute la hauteur considérée. Cette température de l'eau dans le puits correspond typiquement à la moyenne de la température des roches entre le niveau supérieur de l'eau dans le puits et de la température non perturbée des roches à la profondeur du puits.

En solution de base, l'utilisation thermique envisagée doit rechercher des niveaux de la température peu différents de la température moyenne du Puits Y. Dans la présente étude on considérera :

- En période estivale : une injection de chaleur conduisant à une température du Puits Y ne dépassant pas 30 °C ; température de ressource au-delà de laquelle la performance des dispositifs de climatisation peut être trop faible.
- En période hivernale, un puisage de chaleur abaissant la température du Puits Y typiquement vers 15 °C ; température à laquelle la performance des pompes à chaleur pour le chauffage restent encore très performantes.

Les investigations porteront en priorité sur le raccordement des bâtiments de la ZA Morandat, en particulier les 40 000 m² qu'il est prévu de construire d'ici 2020. Une évaluation portant sur une surface raccordée jusqu'à 80 000 m² pourra être également examinée, notamment si elle permet de compenser tout ou partie du déséquilibre

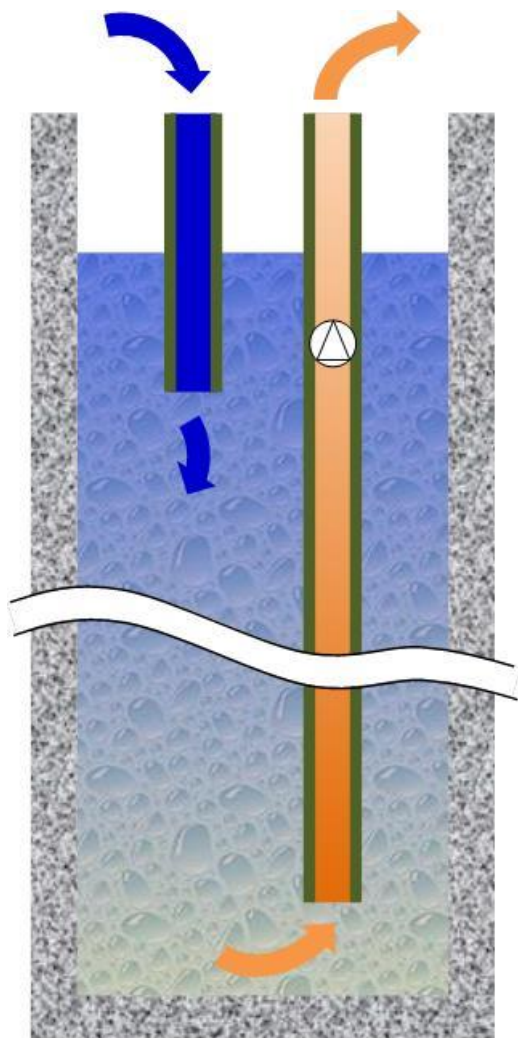
3. Phase 1 : Examen de l'état de l'art applicable

3.1. SOLUTIONS GEOTHERMIQUES - SCHEMAS DE PRINCIPE

Les solutions géothermiques pouvant être adaptées au cas du Puits Y sont au nombre de trois (3). Elles sont succinctement décrites dans les pages qui suivent :

- Circulation du fluide en boucle ouverte : PACP (puits à colonne permanente)
- Circulation du fluide boucle fermée : Simple-U ou Double-U
- Circulation du fluide boucle fermée : Géométrie coaxiale

3.1.1. Solutions en boucle ouverte de type "PACP"



En géothermie, la technique PACP (Puits à Colonne Permanente) reste assez rarement employée en France car elle nécessite une épaisseur importante du niveau aquifère exploité (puissance en hydrogéologie).

Dans la littérature, cette technique géothermique est désignée par SCW (Standing Column Well). Elle est plus particulièrement employée en Amérique du Nord (USA et Canada).

Pour les réservoirs industriels, enterrés ou non, de nombreuses variantes existent, notamment afin de maîtriser la stratification.

D'une manière très générale, cette technique reste employée pour des extensions horizontales proportionnellement bien plus importantes vis-à-vis de la hauteur que dans le cas envisagé.

Néanmoins, même avec peu de retour sur expérience, on peut considérer que cette technique est disponible puisqu'elle ne fait appel à aucun composant spécifique. En effet, chacune des deux colonnes est indépendante de l'autre et est constituée d'un tubage, éventuellement équipé d'une crépine et d'une pompe d'exhaure immergée.

Ces colonnes pourront être en acier, éventuellement inoxydable, ou en composite (résine + fibre de verre). De tels composants existent dans les secteurs de l'eau potable et dans le secteur pétrolier.

On pourra admettre que plusieurs dispositifs de ce type pourront être juxtaposés dans le Puits Y, éventuellement à des profondeurs différentes.

Figure 6 : Principe de la technique géothermique en boucle ouverte dite "PACP" (puits à colonne permanente)

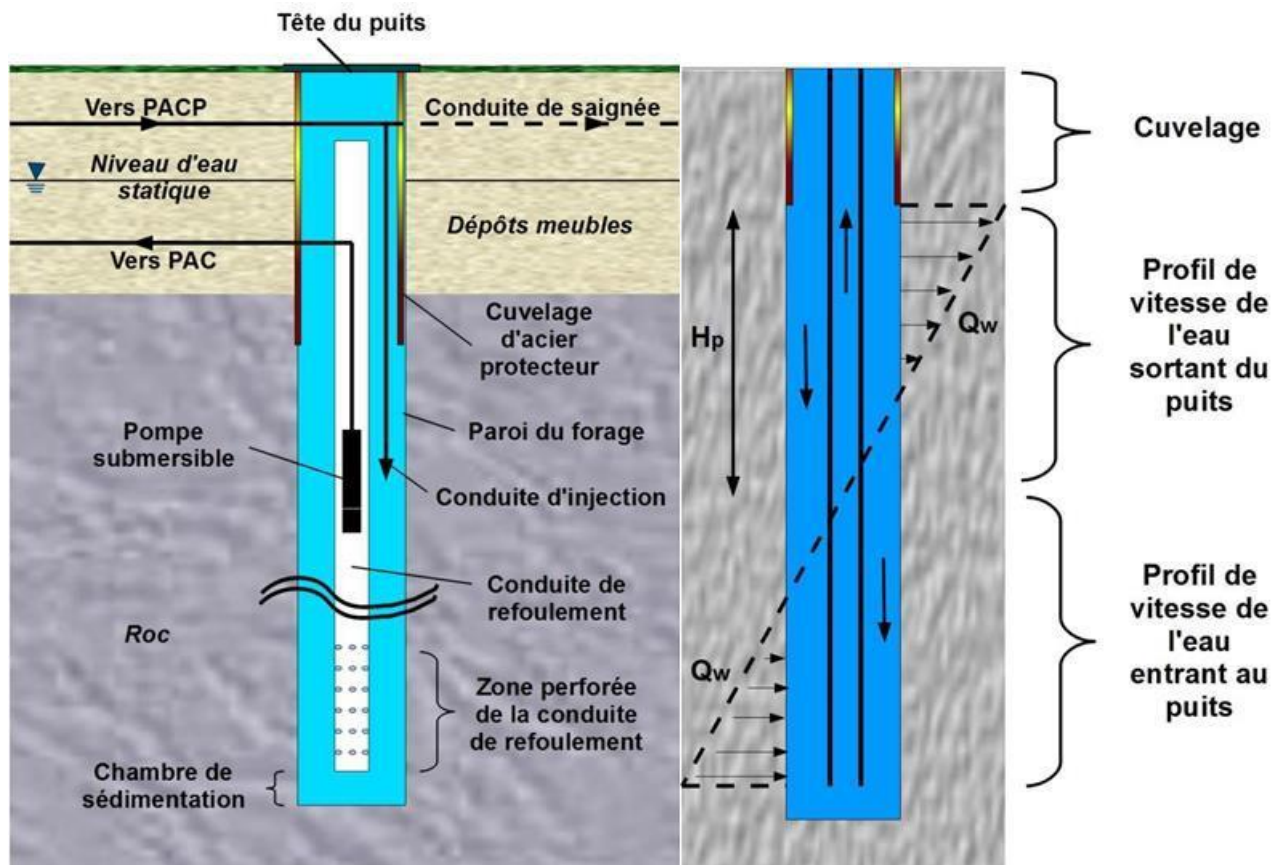


Figure 7 : Schéma de principe des ouvrages géothermiques de type PACP (Source Croteau, 2011)

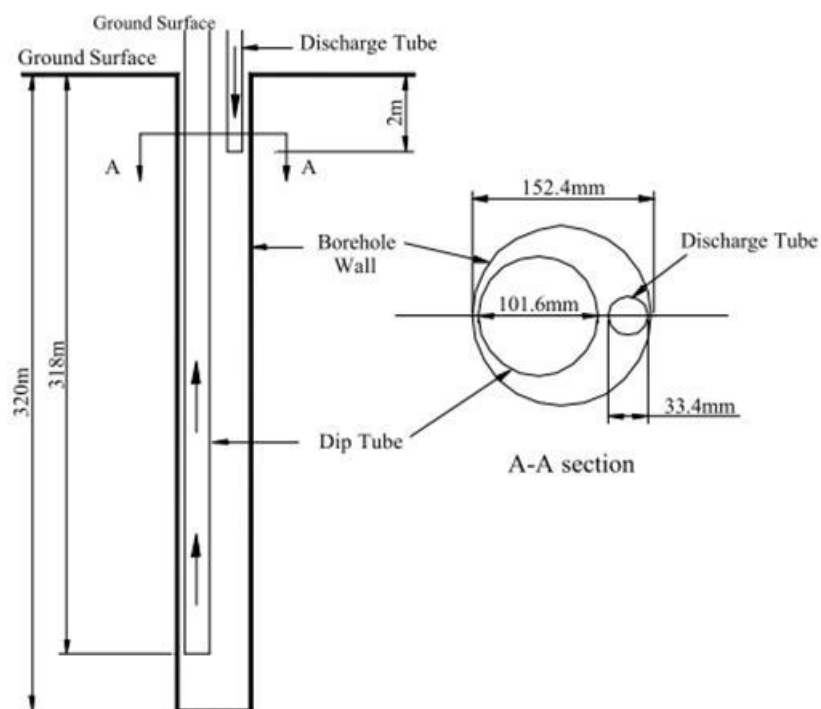
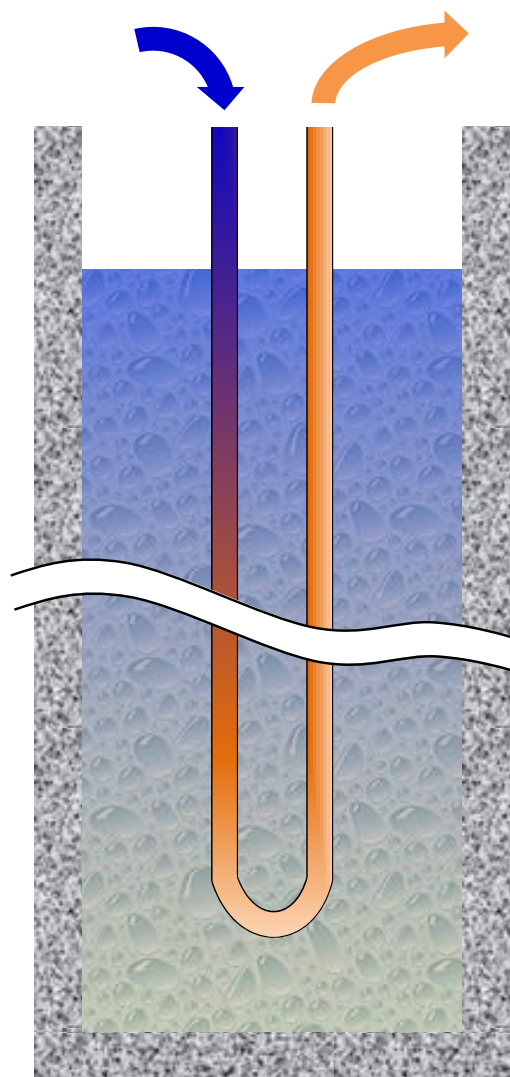


Figure 8 : Dimensions typiques d'un ouvrage de type PACP (Source ASHRAE, 2002)

3.1.2. Solution en boucle fermée de type "simple U" ou "double U"



En géothermie, la technique de la boucle fermée correspond à un échangeur de chaleur enterré. Ici, il s'agira d'un échangeur de chaleur ennoyé.

L'intérêt réside dans les faibles pertes de charge du circuit fermé et dans la longue période de fonctionnement sans nécessité de maintenance.

Usuellement, les échangeurs de chaleur de ce type les plus profonds ont un diamètre au moins égal à 40 mm pour chacun des tubes qui peuvent être au nombre de 4 dans un même forage, ce qui représente en fait deux boucles en U juxtaposées.

Les échangeurs profonds de ce type qui sont connus n'excèdent pas 800 m. La résistance à la pression des tubes peut alors devoir dépasser 120 bars.

Dans le cas du Puits Y, malgré la profondeur, les efforts pourraient rester contenus tant dans l'axe vertical qu'en pression différentielle. En effet, la masse volumique des matières employées reste faible et les efforts les plus importants seront constatés dans la partie supérieure non ennoyée.

Si cette solution, qui présente l'intérêt de la grande simplicité, est retenue, y compris jusqu'à la profondeur maximale de 1 100 m, il sera probablement nécessaire de recourir à une fabrication spéciale, par exemple chez le fabricant REHAU qui propose des sondes jusqu'à 800 m de profondeur en diamètre 63 mm.

Toutefois, dans l'hypothèse d'une forte convection induisant une température relativement homogène de la colonne d'eau dans le Puits Y, l'intérêt d'une grande profondeur des échangeurs reste à examiner

Figure 9 : Principe de la technique géothermique en boucle fermée dite "Simple U"

A titre indicatif, les échangeurs de chaleur enterrés comme les sondes géothermiques en Simple-U ou en Double-U représentent des puissances thermiques installées de l'ordre de 5 kW par 100 m de profondeur ; cette valeur indicative étant grandement conditionnée par la nature des roches.

L'utilisation d'échangeurs de chaleur comme les sondes géothermiques dans des colonnes d'eau reste grandement méconnue, notamment au regard des phénomènes de transport convectifs dus aux circulations d'eau. En tout état de cause, les informations disponibles tendent à indiquer des puissances unitaires d'échange au moins deux fois supérieures au cas des sondes implantées dans des milieux solides ; le facteur limitant restant, dans le cas présent, le stock thermique accessible dans le Puits Y. En première approche, une puissance

installée unitaire de 10 kW par 100 mètres de profondeur parait néanmoins pouvoir être retenue.

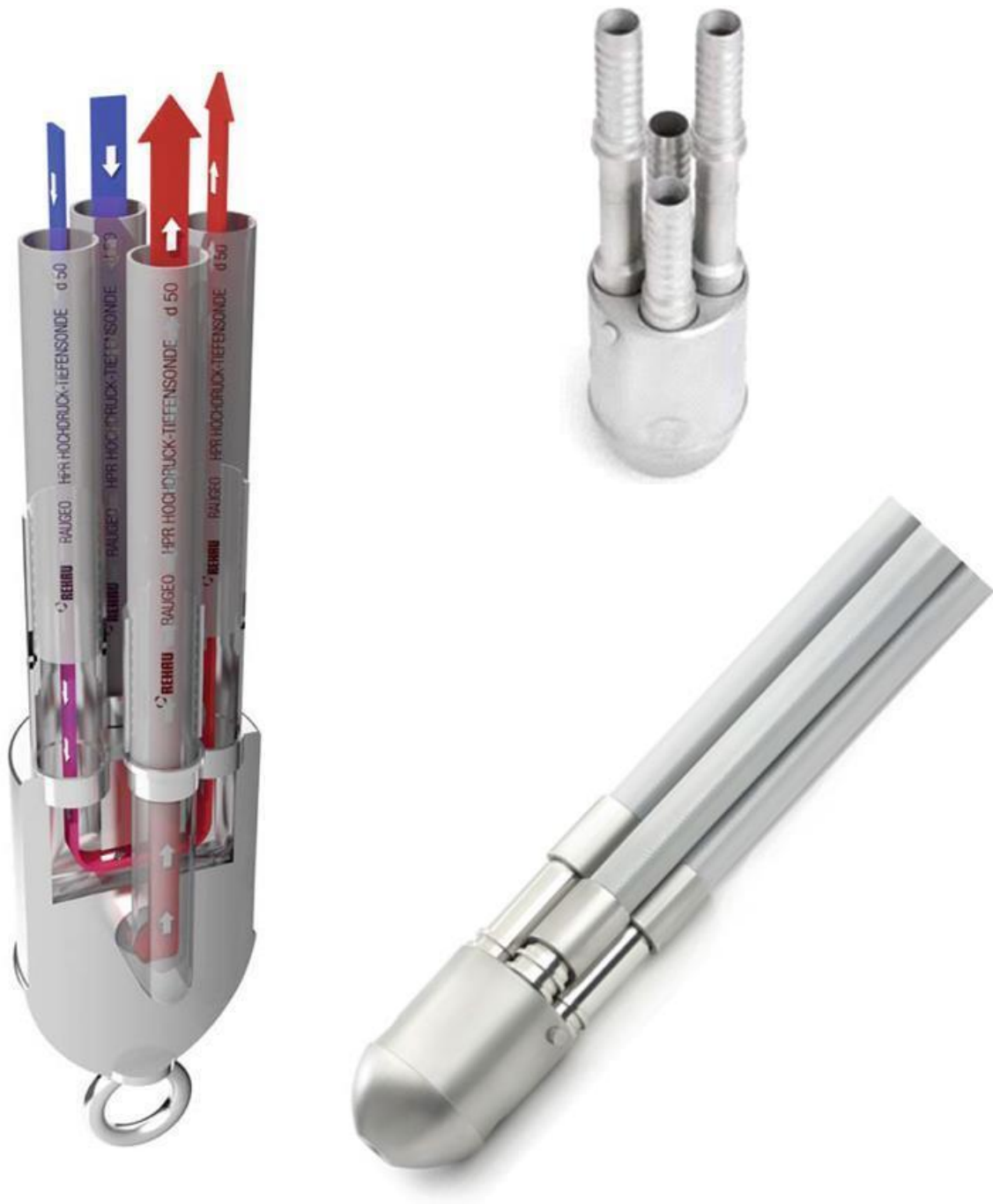
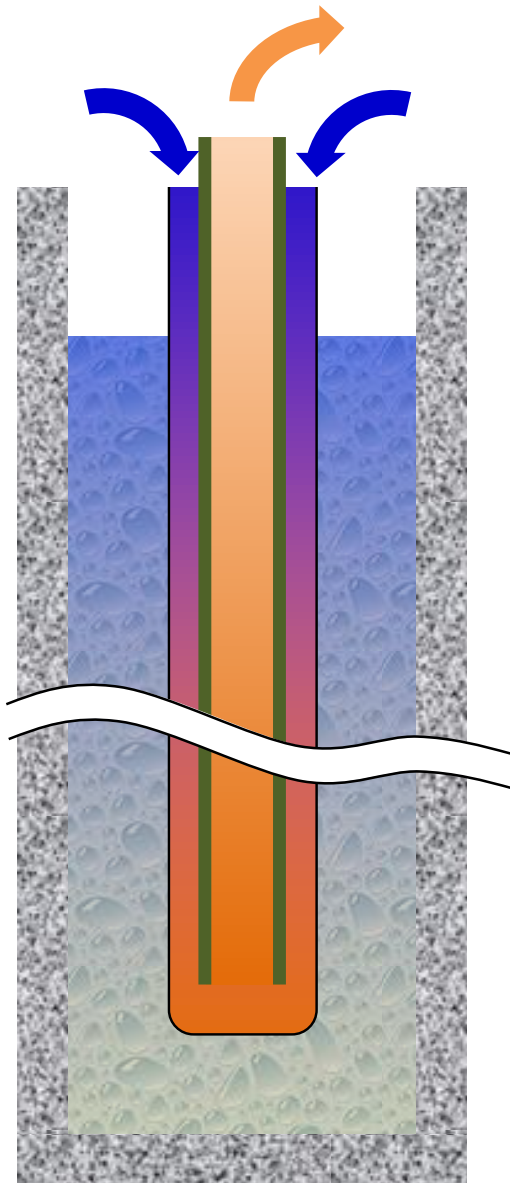


Figure 10 : Détails d'une sonde géothermique profonde Doule-U - Rehau-HPR



Figure 11 : Photographie d'une sonde géothermique Rehau-HPR avant mise en place

3.1.3. Solution en boucle fermée de type "coaxiale "



En géothermie, la technique de la boucle fermée correspond à un échangeur de chaleur enterré. Ici, il s'agira d'un échangeur de chaleur ennoyé. Tout comme pour les sondes en U, l'intérêt réside dans les faibles pertes de charge du circuit fermé et dans la longue période de fonctionnement sans nécessité de maintenance.

De plus, la géométrie coaxiale procure de meilleures performances thermiques car on peut conférer au tube central une isolation thermique, au moins partielle. De la sorte, il est possible de favoriser les zones d'échange thermique et de limiter les échanges thermiques entre les circuits montants et descendants.

Techniquement, on peut envisager une sonde coaxiale en modifiant une colonne de pompage d'eau, en acier ou en composite, de manière à l'obturer en bas et à placer en son centre un tube qui sera centré. Vis-à-vis d'une colonne d'exhaure, il ne sera pas nécessaire d'immerger la pompe.

Jusqu'à 800 m de profondeur, il existe également des produits commerciaux, encore au stade du démonstrateur, qui semblent pouvoir être implantés directement dans le Puits Y, en particulier la sonde Rehau-HPR en diamètre extérieur 110 mm.

En première approche, il est proposé dans la présente étude de considérer que le débit de fluide caloporteur dans une sonde coaxiale ennoyée est de l'ordre de 10 m³/h alors que le ΔT entre l'entrée et la sortie du fluide caloporteur est typiquement de l'ordre de 2°C à 5 °C, selon la température d'entrée vis-à-vis de la température de l'eau dans le Puits Y.

Figure 12 : Principe de la technique géothermique en boucle fermée dite « Simple U »

Tout comme pour les échangeurs de chaleur enterrés en Simple-U ou en Double-U, les puissances thermiques installées pour les sondes géothermiques coaxiales sont de 5 kW par 100 m de profondeur ennoyée.

Contrairement aux sondes en U, des installations à relativement grandes profondeurs existent pour les sondes coaxiales, soit pour des technologies comparables à celles des sondes en U et composées de tubes de petits diamètres pouvant être livrés en touret, soit pour des technologies issues de la technique des forages profonds pour l'eau potable, la géothermie ou les hydrocarbures. Dans ce second cas, les diamètres peuvent être significatifs et les puissances d'échanges augmentent en conséquence ; le facteur limitant restant le milieu dans lequel la sonde coaxiale est implantée.

Aussi, tout comme pour les sondes en U, on retiendra en première approche, que la puissance unitaire installée peut atteindre 10 kW par 100 mètres de profondeur.



Figure 13 : Détails d'une sonde géothermique profonde Coaxiale et comparaison avec une sonde Double-U de puissance thermique similaire (Source : Rehau-HPR)



Figure 14 : Vue du touret où est enroulé une sonde coaxiale en PEHD-Xa de 450 m de profondeur et 90 mm de diamètre (Source Rehau, Projet Zumikon, Suisse)

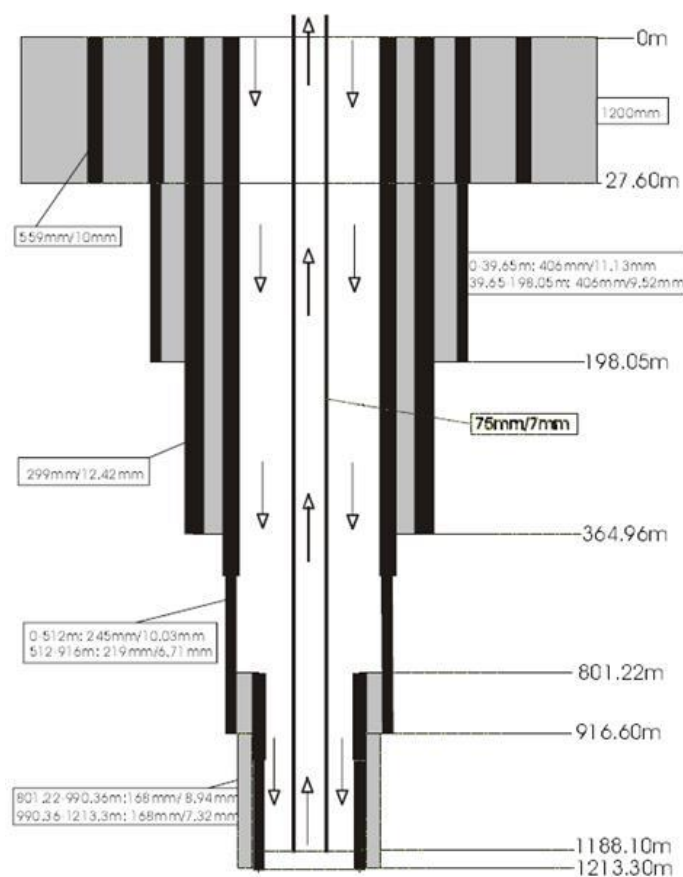


Figure 15 : Coupe technique de la sondes de Weissbad dans le canton d'Appenzell en Suisse et dont la profondeur est proche de celle du Puits Y

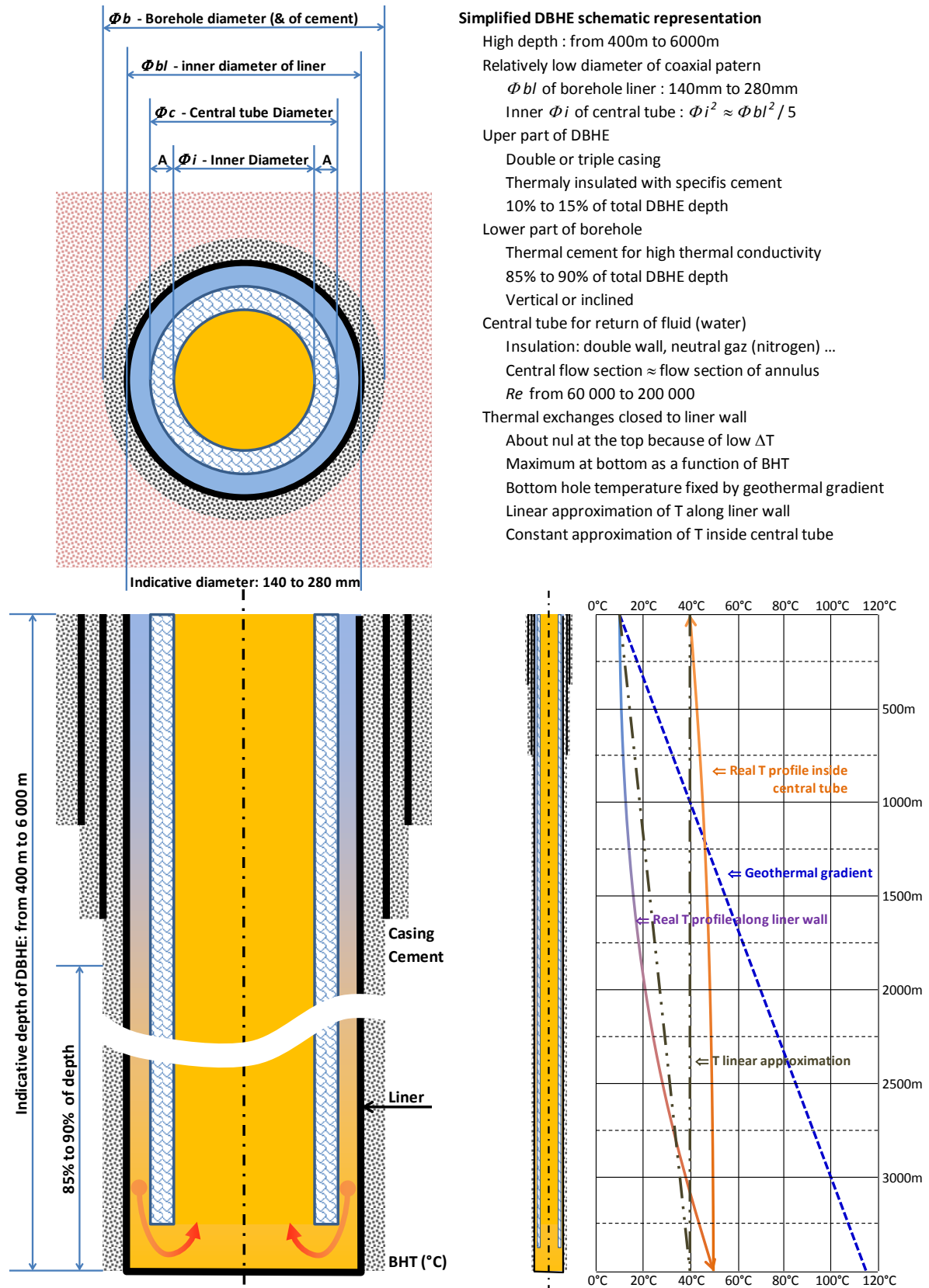


Figure 16 : Représentation schématique d'une sonde géothermique profonde implantée dans un milieu rocheux et de ses performances (Source BRGM, 2015)

3.2. USAGE DIRECT ET MACHINERIE THERMODYNAMIQUE

3.2.1. Usage direct : chauffage et rafraichissement

On définit l'usage direct d'une énergie thermique comme étant *possible* lorsque le niveau de la température de ladite énergie thermique permet de satisfaire directement le besoin de l'utilisateur sans nécessité d'adapter le niveau de la température.

Cas du chauffage en usage direct

- Pour le chauffage par plancher chauffant, la température délivrée doit permettre d'atteindre 25 °C en tout point du circuit ; ce qui signifie typiquement une température délivrée de 28°C à 30 °C
- Pour le chauffage par ventilo-convecteur, la température délivrée doit permettre d'atteindre une température de 25 °C pour l'air soufflé ; ce qui signifie une température de l'eau en entrée de ventilo-convecteur typiquement de 35 °C en raison d'un pincement de l'échangeur eau/air de l'ordre de 10 °C.

Cas du rafraichissement direct

- Pour le rafraichissement direct en plancher ou plafond rafraichissant, on convient usuellement d'une température au moins égale à 16°C pour éviter la condensation et, typiquement, de 20 °C à 25 °C.
- Pour le rafraichissement direct en ventilo-convecteur, on convient usuellement que la température de l'air soufflé peut difficilement être inférieure à 25 °C ou 27°C ; ce qui impose une température de l'eau de 15 °C à 17°C si le pincement est de 10 °C. L'éventualité d'une condensation au niveau de l'échangeur du ventilo-convecteur n'est alors pas à exclure.

A retenir : En géothermie, l'usage direct de la chaleur est toujours à privilégier lorsqu'il est possible, car cela permet de minimiser significativement la consommation d'énergie électrique et donc de maximiser la part d'énergie renouvelable dans l'énergie utile (énergie finale).

Indicateur de performance en usage direct

On définira la performance d'un système thermique recourant à l'usage direct en établissant le rapport de l'énergie utile par l'énergie électrique consommée ; l'énergie utile pouvant être :

- de la chaleur pour les applications de chauffage ou de production d'eau chaude
- du frais pour les applications de rafraichissement.

On peut considérer en première approximation que la consommation d'électricité pour le pompage des fluides caloporteurs dans les installations géothermiques et dans les circuits de distribution représente de l'ordre de 2% à 5% de l'énergie thermique délivrée (énergie utile). *Cela correspond à l'énergie géothermique échangée dans le cas de l'usage direct.*

A retenir : Dans le présent document, il est proposé de considérer que la consommation d'énergie électrique pour le pompage et la distribution d'une énergie géothermique en usage direct représente toujours au maximum 5% de l'énergie géothermique échangée.

3.2.2. Pompe à chaleur : chauffage, eau chaude sanitaire et climatisation

Par 'machinerie thermodynamique', on entend un dispositif constitué autour d'une ou plusieurs pompes à chaleur dont la finalité est de produire de l'énergie thermique à un niveau de température adapté aux besoins de l'utilisation finale. Dans le présent document on ne prend en considération que les pompes à chaleur à compression mécanique actionnées par des moteurs électriques.

Indicateur de performance d'une pompe à chaleur

On définit la performance d'une pompe à chaleur en établissant le rapport de l'énergie utile par l'énergie électrique consommée ; l'énergie utile pouvant être de la chaleur pour les applications de chauffage ou de production d'eau chaude sanitaire (ECS) ou être du froid (eau glacée) pour les applications de climatisation.

- **Cas du chauffage par pompe à chaleur géothermique et ECS**

En mode chauffage et ECS, l'indicateur de performance est le COP (coefficient de performance – coefficient of performance)

$$\text{COP} = \frac{\text{Energie utile}}{\text{Energie électrique consommée}} = \frac{E_{\text{chauf.}}}{E_{\text{élec.}}} = \frac{E_{\text{géotherm.}} + E_{\text{élec.}}}{E_{\text{élec.}}}$$

En mode chauffage, il est important de noter que l'énergie géothermique et l'énergie électrique s'additionnent pour constituer l'énergie utile.

- **Cas de la climatisation par pompe à chaleur géothermique**

En mode climatisation, l'indicateur de performance est l'EER (Energy Efficiency Ratio)

$$\text{EER} = \frac{\text{Energie utile}}{\text{Energie électrique consommée}} = \frac{E_{\text{froid.}}}{E_{\text{élec.}}} = \frac{E_{\text{géotherm.}} - E_{\text{élec.}}}{E_{\text{élec.}}}$$

En mode climatisation, il est important de noter que l'énergie utile et l'énergie électrique s'additionnent pour constituer l'énergie géothermique, c'est-à-dire la chaleur qui est rejetée dans le milieu naturel. Il est donc primordial de veiller à l'obtention d'EER favorable, au risque de rejeter des quantités importantes d'énergie thermique d'origine électrique dans la ressource géothermique.

Faux amis

Le COP et l'EER peuvent s'appliquer à la même pompe à chaleur lorsqu'elle est réversible ; ce qui est courant. De ce fait, on peut avoir la tentation de relier le COP et l'EER par substitution dans les équations ci-dessus.

Cette manipulation est cependant trompeuse car les COP et EER sont des indicateurs obtenus dans des conditions de fonctionnement qui peuvent être très différentes. Ces conditions sont essentiellement matérialisées par les températures de part et d'autre de la pompe à chaleur, c'est-à-dire de la ressource et de l'utilisation. L'exemple ci-dessous appliqué à une ressource géothermique illustre cela :

	Température froide	Température chaude	ΔT
Mode chauffage	15 °C (géothermie)	45 °C (chauffage)	30 °C
Mode climatisation	7°C (eau glacée)	15 °C (géothermie)	8°C

A retenir :

- Plus la température de la ressource géothermique est élevée, plus le COP d'une pompe à chaleur pour le chauffage est favorable. Avec une ressource actuellement à 28°C dans le Puits Y à 28°C, le COP peut dépasser 5, et atteindre 6.
- Plus la température de la ressource est basse, plus l'EER d'une pompe à chaleur pour la climatisation est favorable. Avec la ressource actuellement à 28°C dans le Puits Y, l'EER reste faible, typiquement de l'ordre de 3 à 4.

Variation de la performance d'une pompe à chaleur

La performance d'une pompe à chaleur n'est en outre pas constante. Elle varie en permanence en fonction des températures des sources chaudes et froides auxquelles elle est raccordée. Ainsi, à l'échelle d'une saison, le COP et l'EER peuvent ainsi varier de manière significative.

Typiquement, pour une machinerie thermodynamique et des émetteurs de chaleur donnés, on obtiendra des allures des variations du COP et de l'EER en fonction de la température de la ressource géothermique telles qu'indiqués par la Figure 17 ci-dessous ; les valeurs réelles étant à obtenir auprès des fabricants.

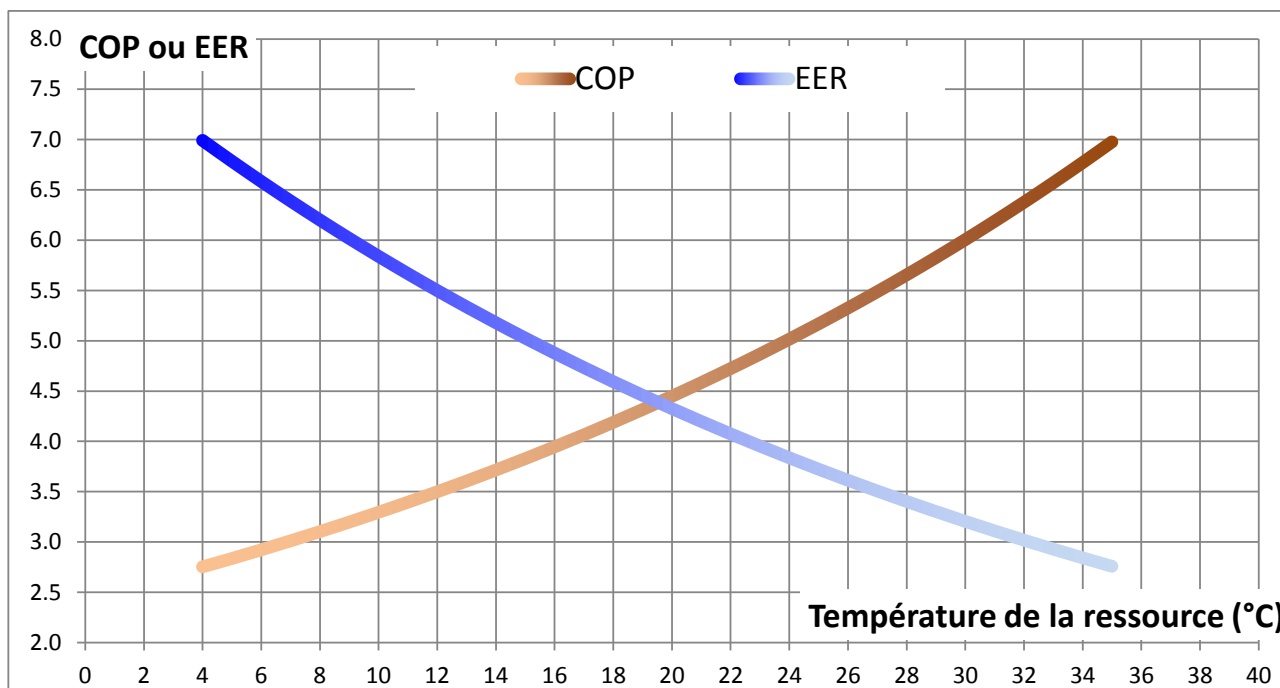


Figure 17 : Allure indicative des variations du COP et de l'EER en fonction de la température de la ressource géothermique

Les conditions de la Figure 17 ci-dessus sont :

- COP = 3.5 à 12°C et taux de variation indicatif de 3% par °C
- EER = 5.5 à 12°C et taux de variation indicatif de 3% par °C

A retenir : Dans l'objectif de limiter les dépenses en électricité, il est primordial de veiller à exploiter, dans la mesure du possible, les ressources géothermiques dont la température est favorable à l'usage final. Le cas échéant, la constitution de stocks thermique inter-saisonniers peut pour cela être à envisager.

3.3. FAVORABILITE DE LA TEMPERATURE D'UNE RESSOURCE

Dans le présent document axé sur l'examen des aptitudes thermiques du Puits Y, on peut d'emblée esquisser un indice de « favorabilité » de cette ressource thermique au regard des systèmes présentés dans les pages qui précèdent et pouvant être constitués pour exploiter ladite ressource.

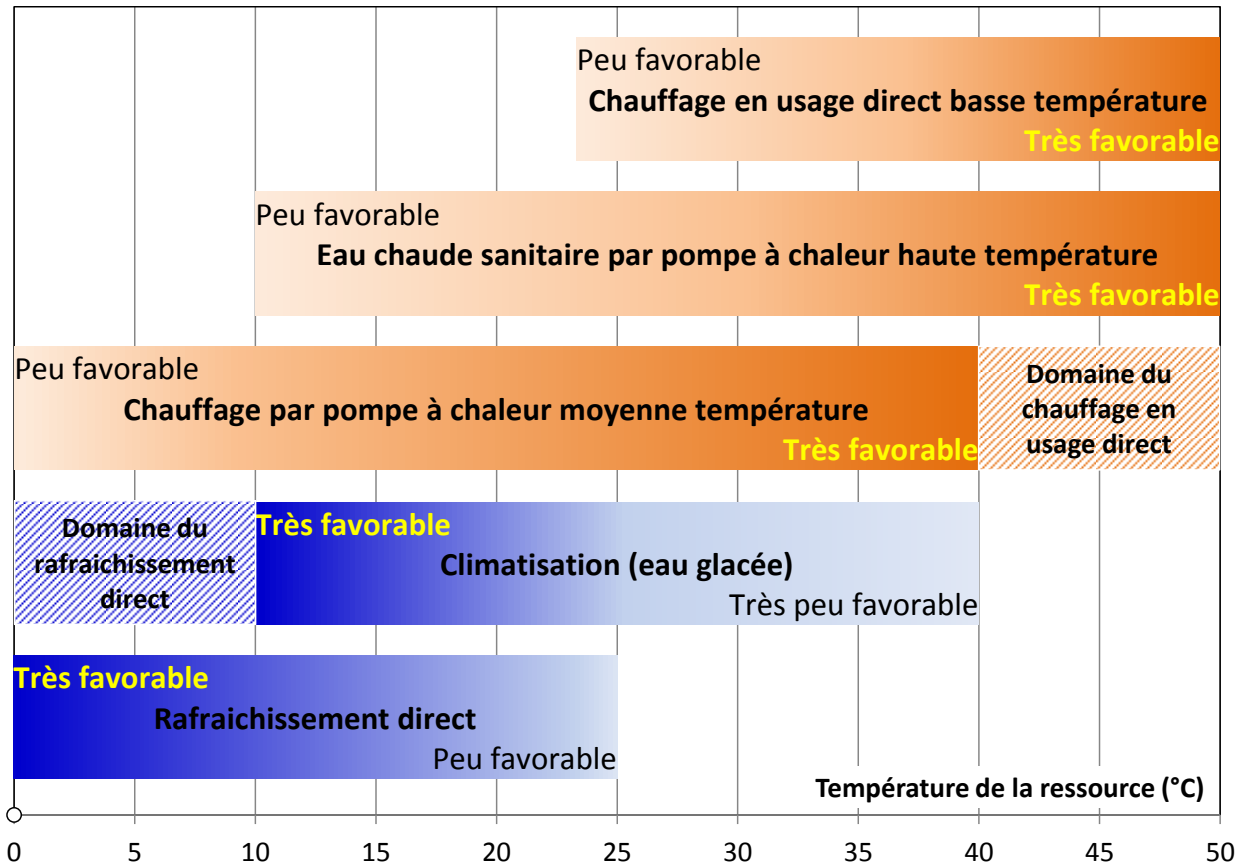


Figure 18 : Indication de « favorabilité » de la ressource au regard des possibles usages thermiques

La « favorabilité » ci-dessus est envisagée au regard des solutions alternatives, notamment les pompes à chaleur aérothermiques couramment mises en œuvre sur le secteur de Gardanne, en particulier pour les applications de climatisation. Vis-à-vis d'une climatisation aérothermique, une solution géothermique offre l'intérêt d'une constance de la température de la ressource le long de la journée ; ce qui peut permettre l'exploitation de toutes les heures favorables du tarif électrique, y compris en pleine journée alors que la température extérieure est élevée.

Pour mémoire – De nombreux groupes frigorifiques pour la climatisation privilégient le fonctionnement en période nocturne avec stockage d'eau glacée, éventuellement avec des systèmes de type STL (Stockage latent en nodules ou en glace) qui sont 5 à 10 fois plus compacts que les systèmes en énergies sensibles de capacité équivalente. Pour mémoire, les coûts d'investissement (surcoût pour le stockage) pour de tels systèmes STL sont de l'ordre de 35 € HT à 45 € HT par kWh installé ; soit typiquement de l'ordre de 15% du coût global d'une installation assurant le confort thermique estival. Malgré une consommation d'énergie électrique supérieure de 40% ; le coût énergétique annualisé est inférieur de 40% à celui d'un système sans stockage.

3.4. DISTRIBUTION EN RESEAU D'ENERGIE - SCHEMAS DE PRINCIPE

3.4.1. Boucle tempérée et pompes à chaleur distribuées

On dira qu'un réseau d'énergie thermique est en boucle tempérée lorsque :

- La température du tube chaud reste de l'ordre de 28°C et moins, c'est-à-dire à un niveau de la température insuffisant pour permettre l'usage direct pour le chauffage en toutes circonstances.
- La température du tube froid est de l'ordre de 13°C ou plus, c'est-à-dire à un niveau de la température insuffisant pour des applications de climatisation ; l'usage direct pour du rafraîchissement restant toutefois envisageable.

La technologie de la boucle tempérée implique l'implantation de machineries thermodynamiques aux lieux des différents usages, c'est-à-dire au niveau des sous-stations, afin d'adapter le niveau de la température en fonction des besoins locaux. En règle générale, ces machineries sont constituées autour de pompes à chaleur à compression mécanique, généralement actionnées par des moteurs électriques.

A retenir : On dira d'un tel réseau d'énergie qu'il fonctionne en boucle tempérée et pompes à chaleur distribuées (ou réparties).

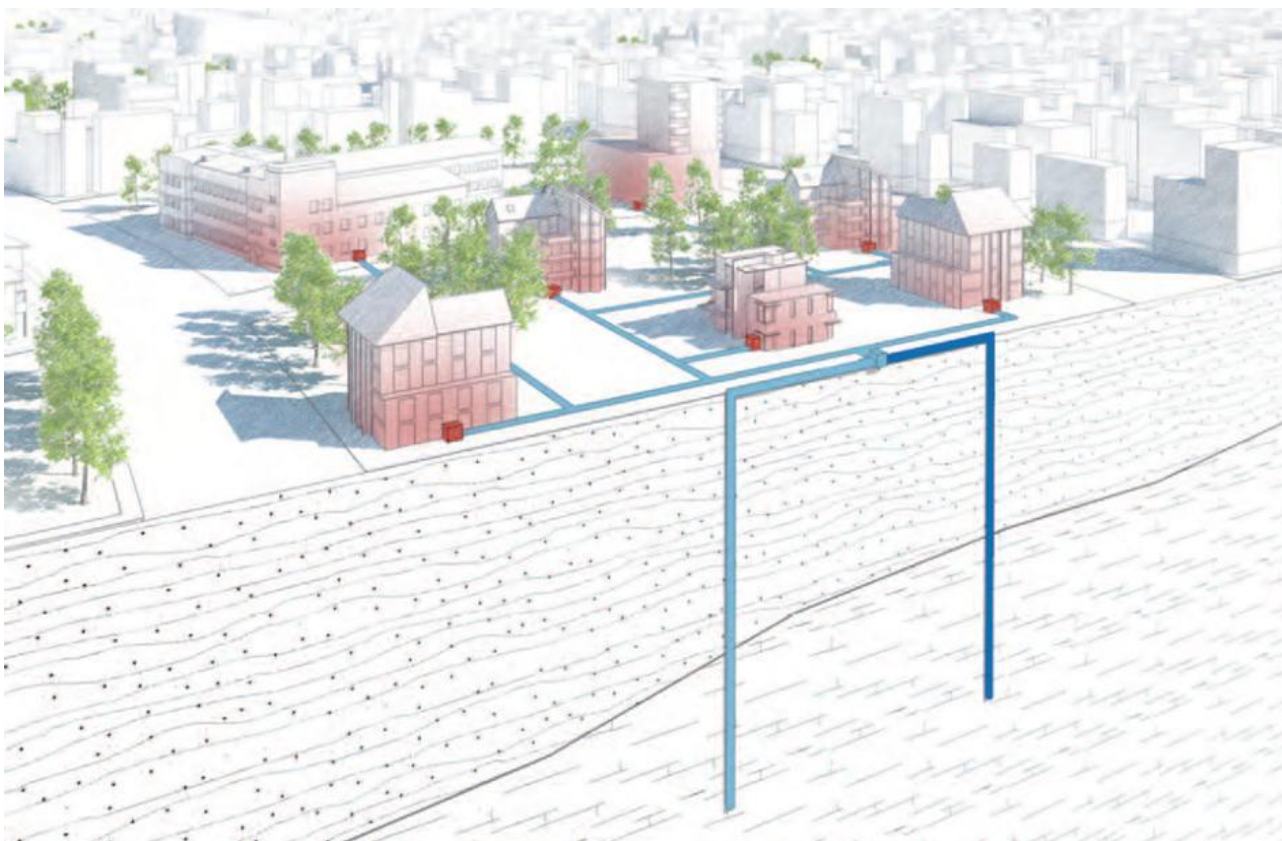


Figure 19 : Représentation schématique d'un réseau de chaleur géothermique en boucle tempérée et pompes à chaleur distribuées (Source BRGM)

3.4.2. Distribution en boucle tempérée "2 tubes"

Cette configuration représente la solution de base pour la plupart des réseaux d'énergie thermique. Du fait d'une relativement basse température dans le réseau, les usages peuvent être le chauffage comme le rafraîchissement. Ainsi, localement, c'est-à-dire au niveau de chaque sous-station, il est possible d'inverser le sens d'utilisation. C'est par exemple le cas si un usager éprouve un besoin de rafraîchissement alors que les autres usagers restent en mode chauffage.

Dans ce cas, on pourra puiser l'énergie pour le rafraîchissement sur le retour réseau qui est à basse température. Toutefois, une telle configuration ne gère que deux températures, à savoir une température chaude (température dite de départ) et une température froide (température dite de retour). Aussi, il peut être judicieux d'implanter un ballon tampon pour optimiser les cycles quotidiens de consommation d'énergie.

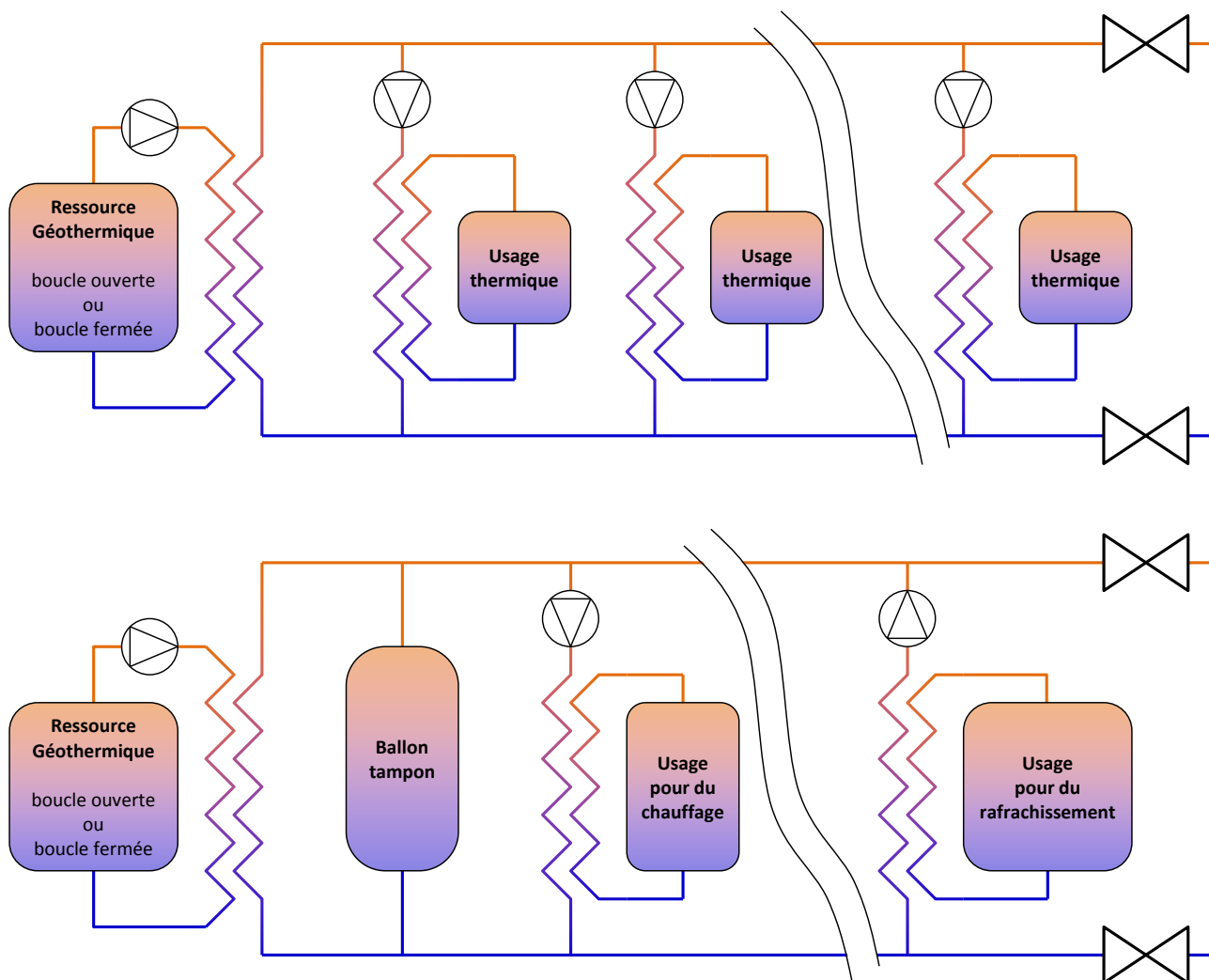


Figure 20 : Schéma de principe d'un réseau géothermique en boucle tempérée '2 tubes'
En haut : Usage unique pour le chauffage – En bas : Usage mixte pour du chauffage et du rafraîchissement (Source BRGM)

A retenir : Dans le cadre de la présente étude, l'architecture de réseau en boucle tempérée de type "2 tubes" représente la configuration de référence.

Pour le mode chauffage prioritaire en saison hivernale, on pourra considérer qu'à la mise en service de l'installation, la température de départ réseau sera typiquement de l'ordre de 28°C, alors qu'avec un ΔT typiquement de l'ordre de 15 °C, la température de retour réseau attendue devrait s'établir autour de 12°C à 13°C. Cette température correspond à celle de réinjection dans le Puits Y.

Pour le mode rafraîchissement prioritaire en saison estivale, la température de départ réseau se doit d'être la plus basse possible, ce qui peut conduire à recommander la constitution de stocks inter-saisonniers frais/froid dans le Puits Y.

3.4.3. Distribution en double boucle tempérée "3 tubes" ou "4 tubes"

Une configuration à '2 tubes' peut rester difficile à optimiser, par exemple si les écarts de températures sont trop importants. Dans ce cas, on pourra préférer une configuration en 3 ou 4 tubes permettant de distribuer plusieurs températures.

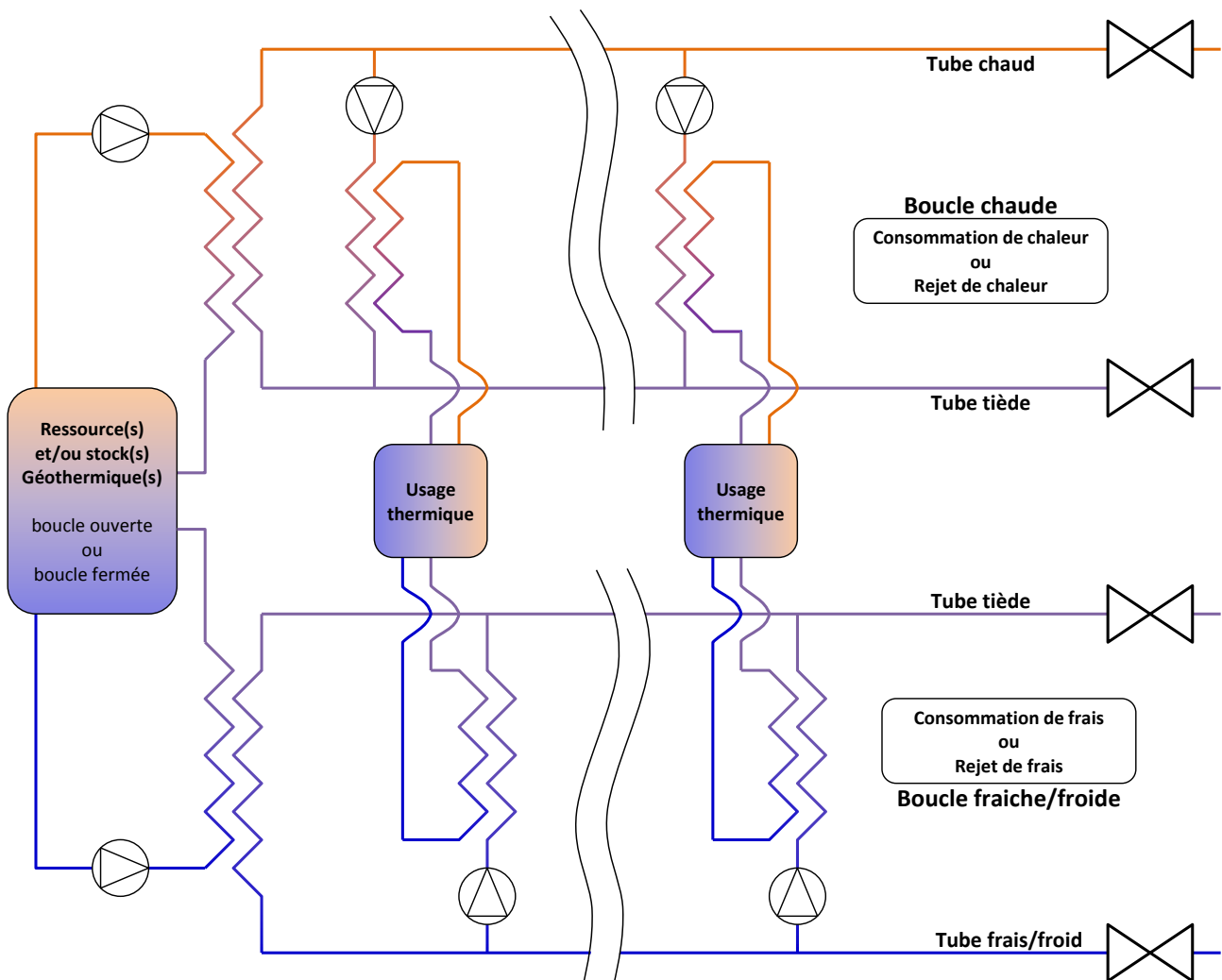


Figure 21 : Schéma de principe d'un réseau géothermique en boucle tempérée "4 tubes" ; les deux tubes tièdes pouvant être confondus pour former un réseau "3 tubes" (Source BRGM)

3.4.4. Solutions proposées par le bureau d'étude BG

Dans son étude, le bureau d'étude BG envisage une distribution en boucle tempérée "2 tubes" exploitant les eaux d'ennoyement du réseau de galeries de l'ancienne mine. Le pompage estival est proposé dans les niveaux inférieurs. Le pompage hivernal est proposé dans les niveaux supérieurs. Une solution alternative exploitant un champ de sondes géothermiques est également évoquée.

Dans la présente étude, la distribution en boucle tempérée est conservée sur le principe mais les ressources géothermiques sont discutées, du fait notamment d'une focalisation sur l'utilisation exclusive du Puits Y ; lequel est dit "aveugle", c'est-à-dire avec des communications hydrauliques restreintes ou inexistantes.

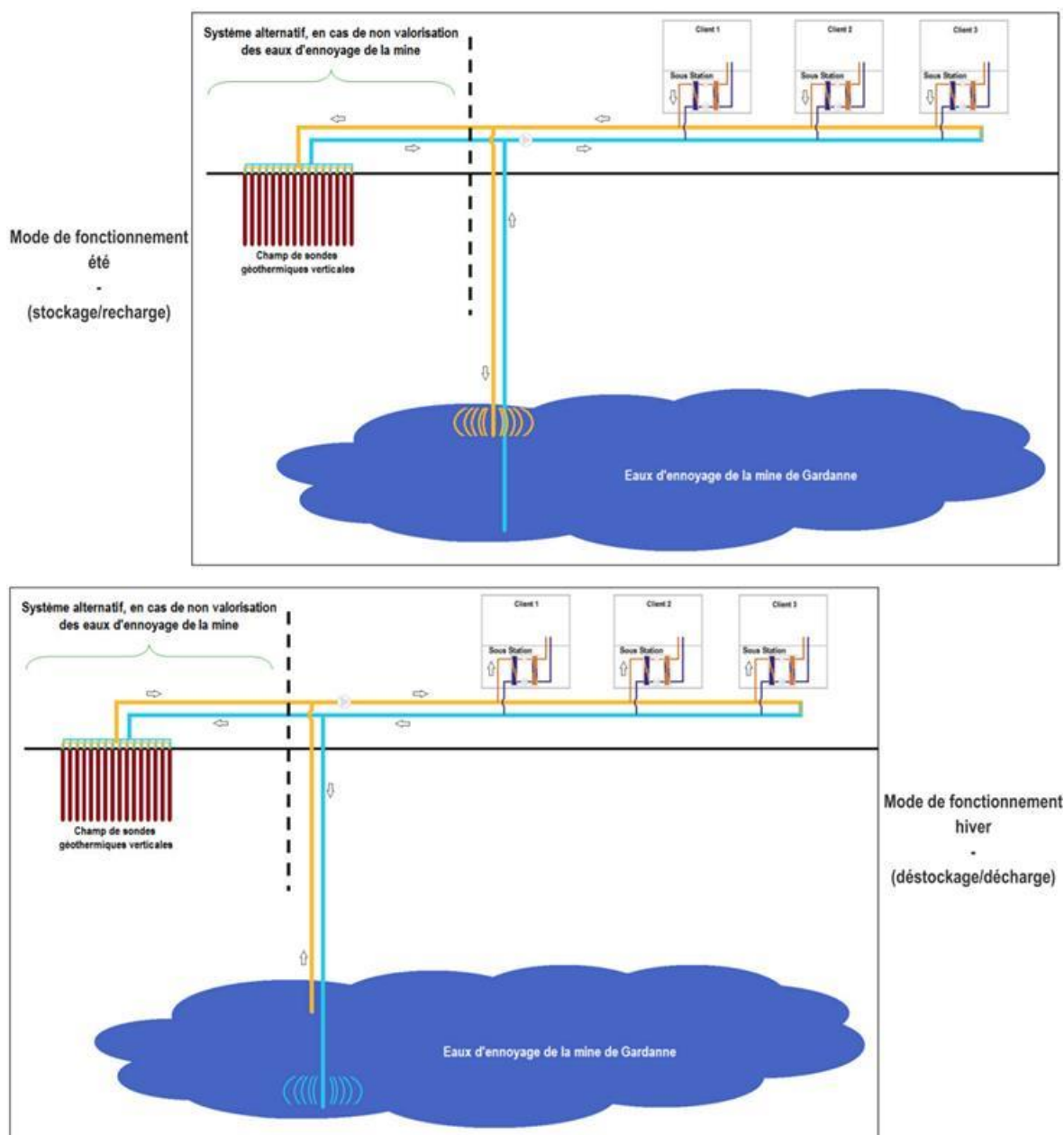


Figure 22 : Solutions géothermiques envisagées par le bureau d'étude BG

3.5. CONCLUSION PARTIELLE DU CHAPITRE : LE PUITS Y, AVANT TOUT UN RESERVOIR D'EAU

3.5.1. Réservoir d'eau matérialisé par le Puits Y

Le Puits Y représente une réserve d'eau significative : plus de 60 000 m³. Or, l'eau présente l'atout d'une relativement forte capacité calorifique de l'ordre de 4.18 MJ/m³.K (1.163 kWh/m³.K). Cela représente près de deux fois la capacité thermique typique des roches. Pour cette raison, et du fait de possibilités d'échanges de chaleur avec l'eau relativement commodes, l'hypothèse d'exploiter ce réservoir paraît devoir être examinée.

En premier lieu, le réservoir d'eau matérialisé par le Puits Y n'étant pas isolé thermiquement de son milieu encaissant (les roches), il peut paraître plus logique de d'abord considérer qu'il s'agit d'une ressource d'énergie géothermique avant de considérer qu'il s'agit d'un réservoir de stockage de chaleur. D'ores et déjà, il faut noter que ce raisonnement peut être exact sur le long terme mais est à significativement nuancer sur le court terme car les échanges de chaleur dans les formations rocheuses restent relativement lents ; ce qui peut permettre de contenir les éventuelles pertes thermiques.

Néanmoins, il faut remarquer que la géométrie allongée du Puits Y se traduit par une surface d'échange relativement grande au regard du volume d'eau ; ce qui ne représente pas nécessairement un atout pour réaliser du stockage à très long terme mais qui, par contre, pourrait convenir assez bien à du stockage inter-saisonnier à la condition que les écarts de la température vis-à-vis de la valeur moyenne restent raisonnables, par exemple de 5 °C à 10 °C de part et d'autre de cette valeur moyenne ; laquelle se doit de rester assez proche de la valeur naturelle des terrains.

En effet, dans un tel cas, on peut considérer que l'énergie thermique injectée sous forme de chaleur en été est récupérable avec une très bonne efficacité durant la saison de chauffage suivante. Inversement, l'énergie thermique injectée à basse température en hiver est récupérable avec une bonne efficacité pendant la saison de rafraîchissement suivante.

C'est précisément cette aptitude qui renforce l'intérêt de la géothermie sur échangeurs verticaux vis-à-vis des solutions aérothermiques. En effet, en première approximation, la performance annuelle d'une telle installation géothermique alternant les livraisons pour le chauffage et pour le rafraîchissement est, *a minima*, comparable à celle d'une installation qui bénéficierait d'une ressource à température constante. Or, cela n'est le cas que lorsqu'on peut disposer d'une ressource en eau très grande au regard des besoins : nappe d'accompagnement d'une rivière, eau de mer, etc.

3.5.2. Température non-perturbée au voisinage du Puits Y

La température de l'eau dans le Puits Y était en 2013 de l'ordre de 25 °C ; cette valeur de la température résultant de l'exploitation minière et des eaux d'ennoiement relativement fraîches. En raison des phénomènes de convection qui s'organisent naturellement dans le puits en l'absence d'obstacle significatif, la température de l'eau est toujours relativement homogène.

Du fait de la régénération thermique naturelle assez lente ou de l'exploitation géothermique pouvant agir assez rapidement, cette température peut évoluer mais on notera que la température initiale non perturbée, c'est-à-dire avant l'exploitation minière, représente un bon indicateur des possibles températures d'exploitation. Ainsi, on rappellera que la température annuelle moyenne des sols en surface est de l'ordre de 14°C alors que, selon des sondages de 1965, la température initiale non-perturbée des roches à la profondeur du Puits Y pourrait être de l'ordre de 35 °C, voire 38°C.

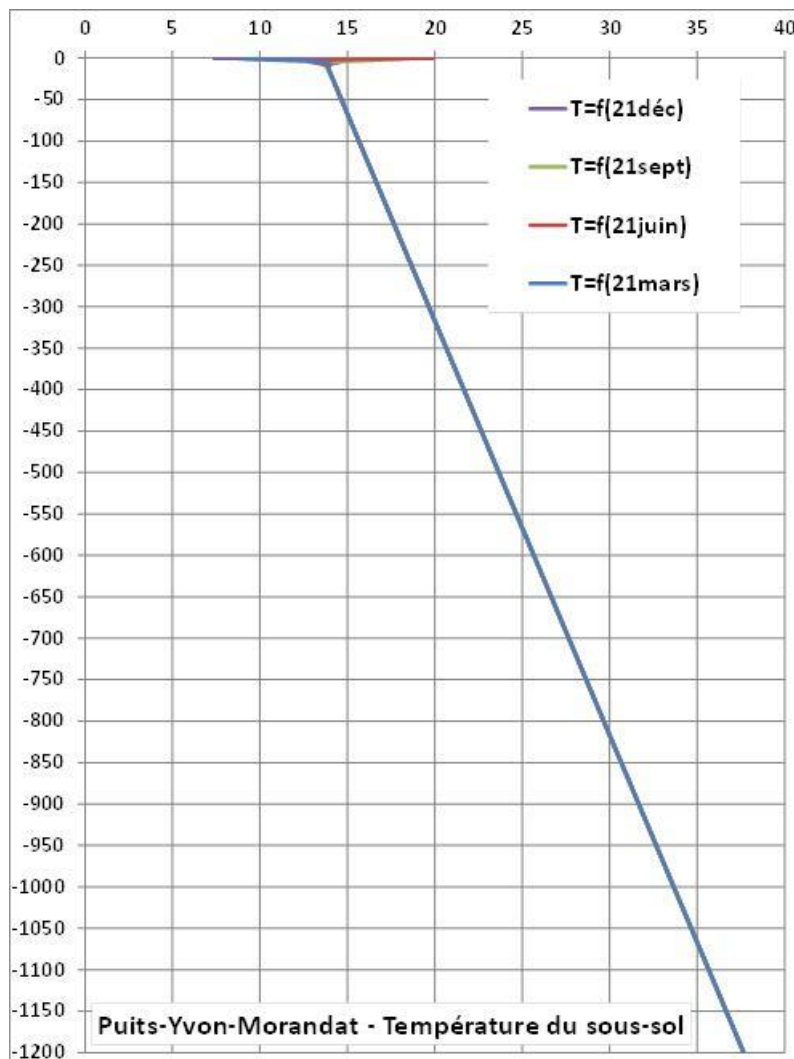


Figure 23 : Estimation de la température initiale non-perturbée des roches au droit du Puits Y sur la base d'un gradient géothermique de $0.02^{\circ}\text{C}/\text{m}$ déduit des sondages de 1965.

3.5.3. Température de l'eau dans le Puits Y

Pour les simulations, la température moyenne de l'eau dans le Puits Y est considérée égale à 28°C . Cette valeur indicative représente la moyenne entre la température à -300 m et celle à la côte -1100 m de la Figure 23 ci-dessus. Actuellement, la température de l'eau serait encore inférieure à 28°C du fait de l'exploitation minière et de l'ennoiement récent. Par ailleurs, on peut considérer en première approche que la température de l'eau est quasi constante sur toute la hauteur du fait des phénomènes de convection qui s'organisent naturellement dans le puits en l'absence d'obstacle significatif.

Une température supérieure à 25°C est favorable à une exploitation pour du chauffage ; le COP d'une pompe à chaleur géothermique si situant alors au-delà de 5.

Par contre, une telle température est moyennement propice aux usages de climatisation des locaux ; la valeur de l'EER pouvant être inférieure à 3.

3.5.4. Ordre de grandeur des quantités d'énergie accessibles

Avant tout examen des techniques d'exploitation thermique du Puits Y, il est indispensable de disposer d'une estimation des quantités d'énergie thermique que peuvent représenter le Puits Y et la masse d'eau qui l'entourne au trois quarts. Pour cela, on va considérer une exploitation saisonnière permettant d'équilibrer les puisages d'énergie pour les usages de chauffage et de production d'ECS et les puisages d'énergie pour les usages de rafraîchissement ou de climatisation. En d'autres termes, on va considérer que l'énergie thermique réinjectée dans le Puits Y pendant la saison estivale, provenant de la chaleur extraite des bâtiments pour les rafraîchir, compense l'énergie qui avait été puisée l'hiver dans le Puits Y pour le chauffage et l'énergie puisée en continu pour produire l'ECS. **De la sorte, le Puits Y retrouve son état d'origine tous les ans à la même époque.**

Le calcul simplifié ci-dessous estime les quantités d'énergie contenues dans le volume cylindrique d'eau et dans le volume annulaire des roches immédiatement avoisinantes. Le volume d'eau est considéré homogène en température. Un gradient de température est considéré dans le volume annulaire des roches faisant que sa variation moyenne de température y est de l'ordre de trois fois inférieure à celle de l'eau dans le Puits Y. Le calcul estimatif est le suivant :

Estimation de l'énergie thermique utilisable dans le Puits Y	
Diamètre du puits	10,00 m
Section du puits	78,54 m ²
Diamètre extérieur des roches prises en compte	14,00 m
Section de l'annulaire de roches (sol)	75,40 m ²
Profondeur utile de l'ouvrage (hauteur envoyée)	800,00 m
Volume de cylindre d'eau	62 831,85 m ³
Capacité thermique de l'eau (à 20 °C)	1,163 kWh/m ³ ,K
Capacité thermique du volume considéré	73 048,06 kWh/K
Capacité thermique du volume considéré	73,05 MWh/K
ΔT estimatif considéré pour l'eau	15,00 °C
Stock thermique indicatif pour le ΔT considéré	1 095 720,92 kWh
Volume de l'annulaire de roches	60 318,58 m ³
Capacité thermique des roches (à 20 °C)	0,639 kWh/m ³ ,K
Capacité thermique du volume considéré	38 567,70 kWh/K
Capacité thermique du volume considéré	38,57 MWh/K
ΔT estimatif considéré pour les roches	5,00 °C
Stock thermique indicatif pour le ΔT considéré	192 838,50 kWh
Cumul des stocks thermiques accessibles	
Stock thermique total (eau + roches)	1 288 559,41 kWh

Tableau 1 : Calcul indicatif des ordres de grandeur de l'énergie et de la puissance thermique qui seraient accessibles dans le Puits Y.

A retenir : Pour un ΔT indicatif de 15 °C, l'ordre de grandeur de l'énergie thermique accessible dans le Puits Y serait de l'ordre de 1,3 GWh par saison.

Pour être durable, le mode d'exploitation doit alternativement puiser et injecter cette quantité d'énergie, au risque d'induire une dérive de la température.

3.5.5. Echanges thermiques au voisinage du Puits Y

Comme succinctement évoqué dans les pages qui précèdent, des échanges thermiques peuvent s'effectuer entre le Puits Y et le milieu rocheux environnant, mais uniquement s'il existe un écart de température entre l'eau contenue dans le Puits Y et ledit milieu rocheux.

Ces échanges thermiques sont essentiellement régis par les phénomènes de conduction thermique dans les milieux solides ; phénomènes qui se traduisent par des flux thermiques relativement modérés tant que les écarts de température restent faibles. Or c'est effectivement le cas même si, en fin de saison hivernale, il est recherché un abaissement de la température de l'eau du Puits Y autour de 15 °C (cas de la configuration A) afin de favoriser les applications de rafraîchissement.

En tout état de cause, le gradient géothermique local (Figure 23 p. 49) tend à augmenter la température de l'eau, mais ce phénomène est assez lent du fait de la conductibilité thermique des roches qui est assez faible, même saturée d'eau.

Ainsi, raisonnablement, il est assez cohérent de considérer que le fonctionnement équilibré entre les puisages de chaleur en saison hivernale et les réinjections de chaleur en saison estivale se traduit par une assez faible pénétration dans les roches de la perturbation thermique, notamment parce que le ΔT imposé en fin de saison hivernale est assez rapidement compensé par la réinjection de chaleur en saison estivale. Cela a pour effet de rétablir la température des roches à une valeur proche de leur température initiale. Néanmoins, il faut considérer que ces roches font partie intégrante du stockage et doivent donc être prises en considération dans l'estimation des capacités thermiques mobilisées au fil des cycles saisonniers.

Dans la présente étude, on considère en première approche que seuls les deux premiers mètres sont suffisamment impactés pour être ajoutés aux volumes du stockage. Cela signifie qu'au-delà de deux mètres, on considère que la température des roches n'est pas perturbée ($\Delta T = 0$) tandis que la température des roches à la paroi est considérée comme étant identique à celle de l'eau du Puits Y. Mathématiquement, le volume des roches concernées est un volume annulaire et, avec les conditions ci-dessus, le ΔT moyen de ce volume de roche ressort comme étant de l'ordre de 1/3 du ΔT constaté aux parois, donc du ΔT constaté dans le volume de l'eau dans le Puits Y.

Ainsi, par exemple, comme le montre le Tableau 1 p. 50, si le ΔT est de 15 °C pour un volume d'eau de 63 000 m³ dans le Puits Y dont le diamètre est de 10 m, alors le volume des roches dans le volume annulaire dont le diamètre extérieur est de 14 m est de l'ordre de 60 000 m³ et son ΔT moyen est de 5 °C.

3.5.6. Contribution négligeable du flux géothermique

La puissance thermique remontant des profondeurs est de l'ordre de 60 mW/m² ; ce qui représente annuellement une énergie de 0,526 kWh par an. Ainsi, si le Puits Y devait n'être utilisé que pour le chauffage et l'ECS, et en prenant en considération que la demande géothermique de la ZA Morandat qui est de l'ordre de 1 GWh (1,3 GWh d'énergie utile), alors il faudrait être en mesure de pouvoir mobiliser une surface représentée par un disque de 1,55 km de diamètre pour que le flux géothermique compense les puisages. Cela ne serait physiquement envisageable qu'à la condition d'avoir une température très largement négative dans le Puits Y. Il en résulterait des performances déplorables des pompes à chaleur.

Dans la présente étude, la régénération thermique est donc obtenue par la réinjection des rejets thermiques des climatisations en saison estivale.

4. Phase 1 : Systèmes énergétiques de référence

4.1. RESSOURCE GEOTHERMIQUE A 28°C (SOURCE : DALKIA)

Les ressources géothermiques à 28°C restent peu exploitées en France.

Parmi les contextes d'exploitation comparables à ceux envisageables au voisinage du Puits Y, on retiendra comme exemple de référence l'opération réalisée à Issy-les-Moulineaux (92) s'appliquant au total à 115 000 m² SHON :

- La ressource géothermique exploite un doublet de forages (géothermie en boucle ouverte), exploitant la nappe aquifère de l'Albien vers 650 m de profondeur avec une température de production de 28°C et de réinjection de l'ordre de 13°C.
- La boucle primaire est un réseau en boucle d'eau tempérée entre 27°C et 28°C alimenté par la géothermie et, en secours, une chaufferie au gaz
- A partir des 18 sous-stations, l'eau est distribuée à 35 °C (mini) dans les planchers chauffants et revient à 30 °C. Le COP des pompes à chaleur se situe entre 5 et 6.
- L'eau chaude sanitaire à 60°C est produite par des pompes à chaleur haute température avec un retour à 55 °C. Le COP est de l'ordre de 3.

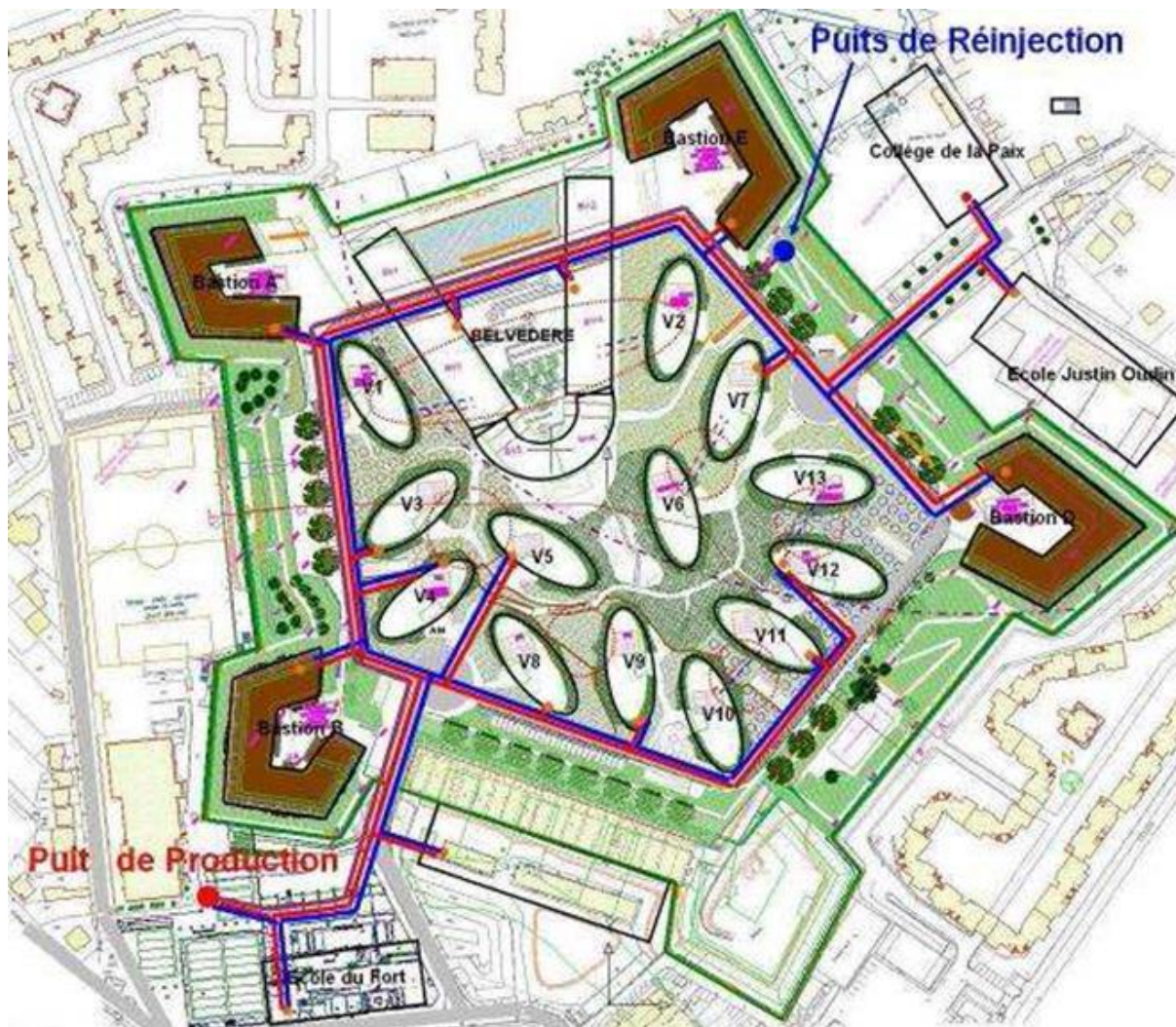


Figure 24 : Schéma d'implantation du réseau en boucle tempérée pour la distribution de l'énergie thermique du Fort d'Issy (Source : DALKIA Ile de France)

4.1.1. Synthèse des données et paramètres du système énergétique implanté au Fort d'Issy-les-Moulineaux

- 115 000 m² SHON comprenant : 1623 logements, 2 écoles (10 000 m²), 1 collège, 1 piscine (2 000 m²), quelques commerces pour 2 300 m²
- Réseau en boucle tempérée : 1 doublet géothermique, un secours gaz (2 MW), 18 sous stations, 60 pompes à chaleur au total
- Température de production (en tête) : 28°C
- Température de réinjection : 13°C ($\Delta T = 15^\circ C$)
- Débit géothermique installé : 185 m³/h
- Puissance installée cumulée des pompes à chaleur pour le chauffage : 5,4 MW
- Puissance installée cumulée des pompes à chaleur pour l'ECS : 1,3 MW
- Capacité de 8,3 GWh issus de la ressource géothermique sur une capacité totale d'énergie thermique livrable pour le chauffage et l'ECS de 11 GWh
- Investissement pour la géothermie (Doublet raccordé) : 3,7 M€ HT dont 1,73 M€ d'aide ADEME
- Investissement global pour le réseau en boucle tempérée incluant la géothermie : 7,5 M€ HT dont 3,2 M€ d'aide accordée par l'ADEME
- Prévision de coût résultant pour le chauffage et l'ECS : 610 € TTC/an par logement de 60 m² dont approximativement 350 € TTC/an de part fixe (dont la moitié environ pour l'amortissement selon le contrat de 25 ans) et le reste en part variable. Pour un logement de 70 m², le coût annuel serait de 675 € TTC/an dont 380 € en part fixe. Ces tarifs sont censés être 10% moins onéreux que la solution gaz concurrente.

4.1.2. Analyse sommaire de l'installation du Fort d'Issy

Les demandes énergétiques sont présentées par les promoteurs comme satisfaisant les critères BBC, du moins pour les 1623 logements. Or, la capacité de production de chaleur excède largement les besoins ; ce qui ne semble pas pouvoir s'expliquer par les demandes des écoles, surfaces commerciales et piscine. Ainsi, en première approche, la surface SHON annoncée de 115 000 m² devrait nécessiter une demande de l'ordre de la moitié seulement de la demande annoncée, à savoir 10 GWh/an.

Malheureusement, le système a été mis en fonctionnement assez récemment et on ne dispose pas encore des relevés réels de fourniture d'énergie.

Ce constat effectué ci-dessus sur les prévisions d'énergies consommées annuellement semble pouvoir être répercuté sur les puissances installées qui paraissent élevées au regard des demandes ; ce qui semble pouvoir s'expliquer par l'absence de stockage tampon pour le chauffage dans les dispositifs répartis dans les boucles secondaires et qui permettraient de diminuer les puissances raccordées par un facteur 2 à 3.

Les ballons pour l'eau chaude sanitaire ont une taille d'environ 40 litres à 50 litres par logement, soit typiquement 2 500 litres pour une résidence de 60 logements. Ainsi la puissance totale pour la production d'ECS devrait pouvoir n'être que de 0,75 MW à 0,80 MW et la puissance totale installée pour le chauffage pourrait n'être que de 1,2 MW à 1,5 MW, soit moins de 2,3 MW au total alors que la puissance cumulée des pompes à chaleur installées atteint 6,7 MW.

On notera qu'à Gardanne, des stockages sont déjà opérationnels pour l'eau glacée.

Vis-à-vis des besoins thermiques à Gardanne, la demande en rafraîchissement n'est pas prise en considération, du moins pas par le système géothermique. Plus précisément, l'option envisagée un temps de produire du rafraîchissement avec les systèmes de production d'ECS n'a pas été retenue à Issy.

A retenir : Dans un réseau en boucle tempérée, le système de production de chaleur à partir d'une eau à 28°C permet de générer un retour à 13°C pouvant être réinjecté dans les équipements géothermiques.

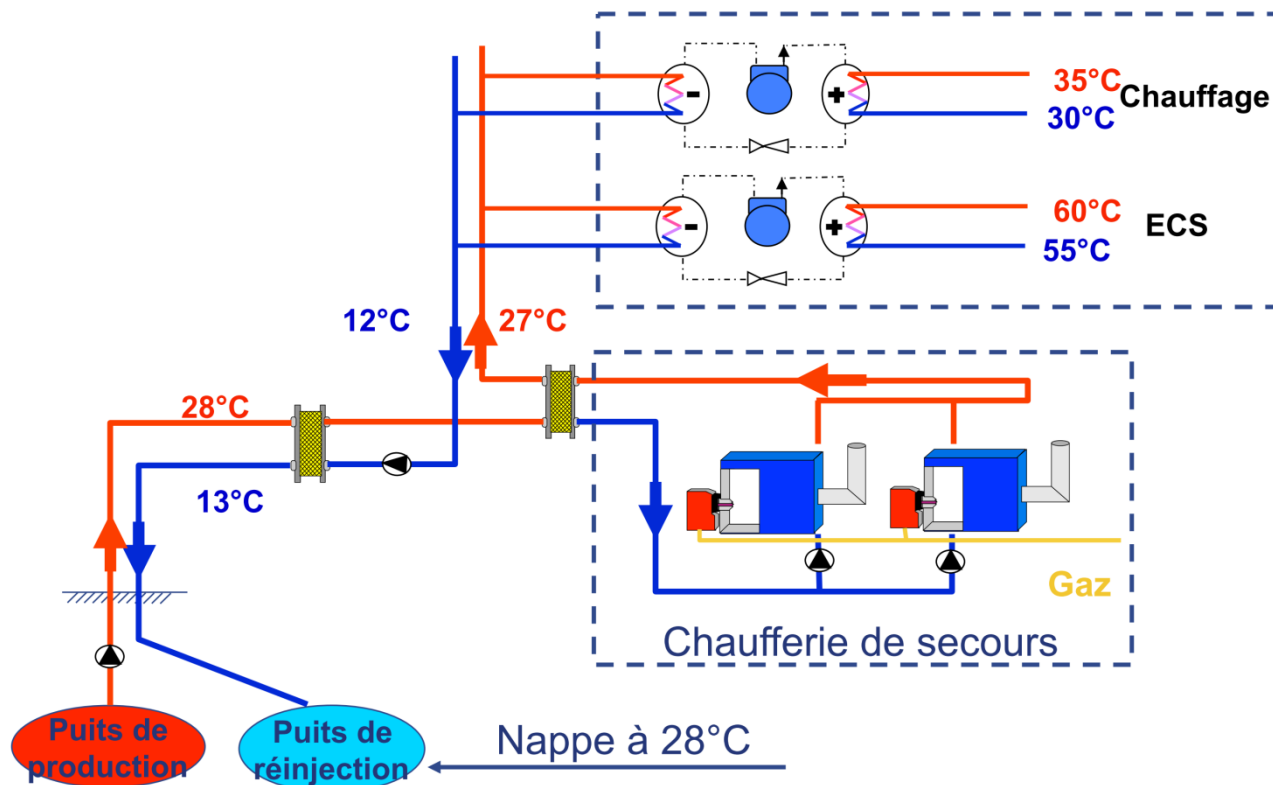


Figure 25 : Schéma de principe du réseau en boucle tempérée sur doublet géothermique à l'Albien pour la fourniture d'eau chaude au Fort d'Issy (source Dalkia Ile de France)

4.2. STOCKAGES THERMIQUES SOUTERRAINS DE GRANDE CAPACITÉ

Le Puits Y représente un volume de stockage supérieur à 62 000 m³ d'eau. Techniquement, il s'agit d'un réservoir de très grande capacité permettant d'envisager des températures de stockage à plus de 28°C (température actuelle) ; la température initiale non-perturbée (avant l'exploitation de la mine) étant probablement significativement au-delà de 40 °C.

Pour information, sont cités ci-dessous quelques exemples de stockages souterrains à plus de 30 °C, pour la plupart employés pour stocker la chaleur solaire, répartis en quatre principales techniques schématiquement représentées ci-dessous ; le Puits Y pouvant, à divers titres, mobiliser chacune de ces quatre techniques.

4.2.1. Cas des stockages en réservoir enterrés

Les deux premières techniques ci-dessous permettent, du moins théoriquement, des écarts importants de la température, d'où des densités de stockages pouvant paraître élevées. Dans la réalité, les ΔT opérationnels sont souvent modérés ; ce qui ramène les densités de stockage à des valeurs guère supérieures à celle des ATES présentés en page suivante.

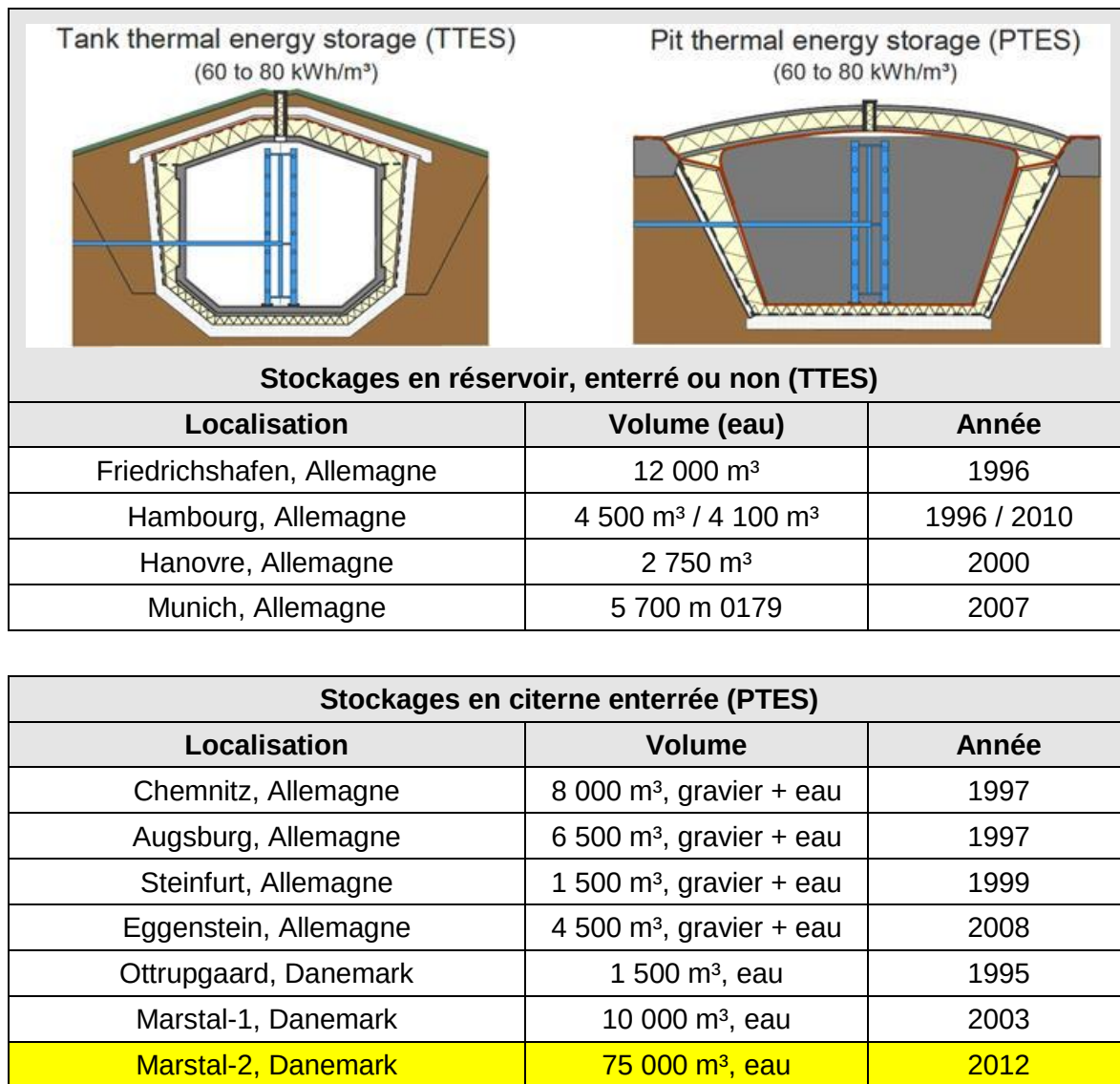


Figure 26 : Quelques exemples de stockages de type TTES et PTES

On remarque que seul le cas de Marstal gère des volumes comparables à celui que peut procurer le Puits Y, à savoir une fosse de 75 000 m³ de type PTES de 88 m x 113 m et 16 m de profondeur.

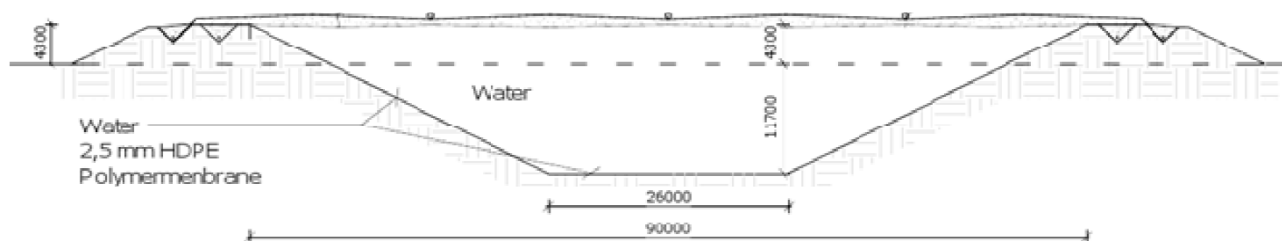


Figure 27 : Coupe schématique du stockage de 75 000 m³ implanté à Marstal, Danemark (2012)



Figure 28 : Photographie du chantier de réalisation du stockage de Marstal, Danemark (2011)

Pour mémoire, la réalisation du stockage de 75 000 m³ à Marstal représente un investissement de 2,65 M€ HT pour une capacité toute théorique de stockage de 6 960 MWh, soit 35,5 €/m³ ou 0,38 €/kWh installé.

Cette capacité théorique de stockage est estimée entre 10 °C et 90°C après mise en place de la couverture flottante d'isolation thermique. La finalité est l'utilisation pour du chauffage direct, c'est-à-dire sans pompe à chaleur. A noter également que les pertes thermiques estimées s'élèvent à 2 500 MWh/an, soit 36% du stock thermique.

Considérant que la puissance installée, en stockage comme en déstockage, est de 10,5 MW, alors l'investissement représente 252,4 €/kW installé. On peut alors remarquer qu'à la puissance nominale, la capacité de stockage représente une durée de fonctionnement de l'ordre de 700 heures.

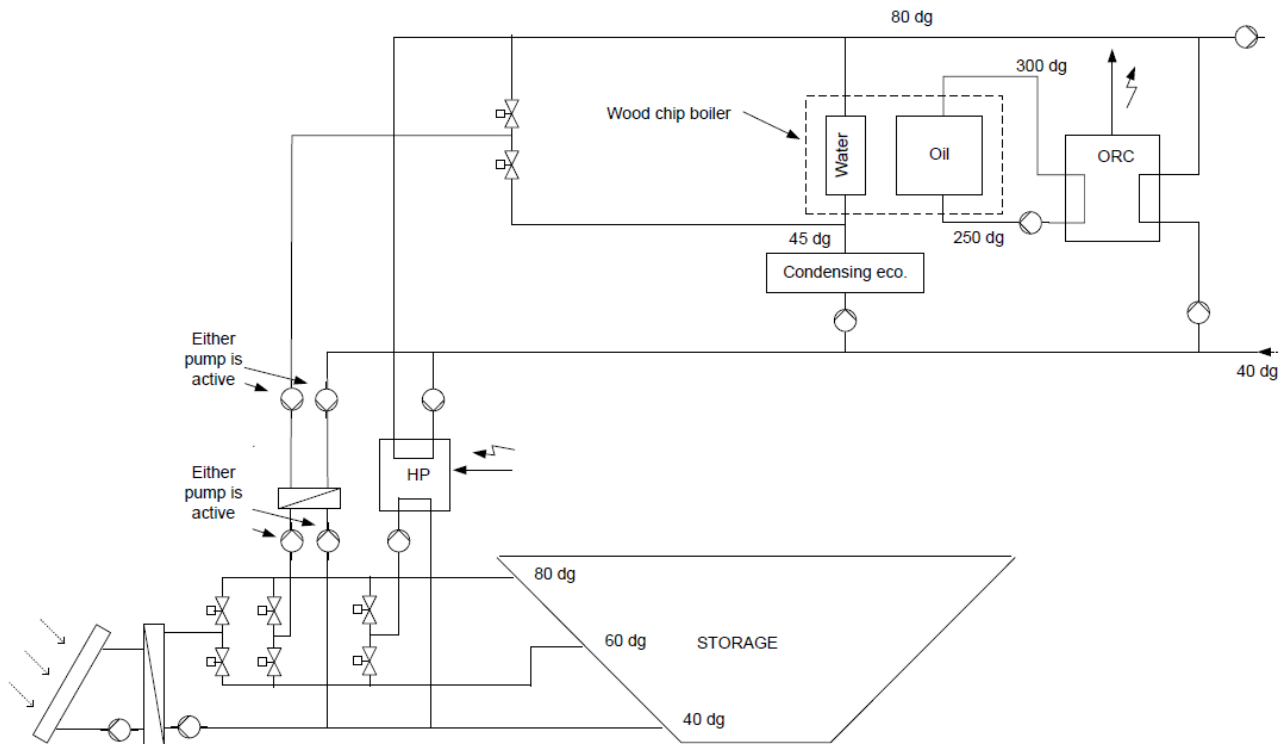


Figure 29 : Schéma logique du fonctionnement du stockage de Marstal (Danemark) pouvant atteindre 80°C en partie haute.

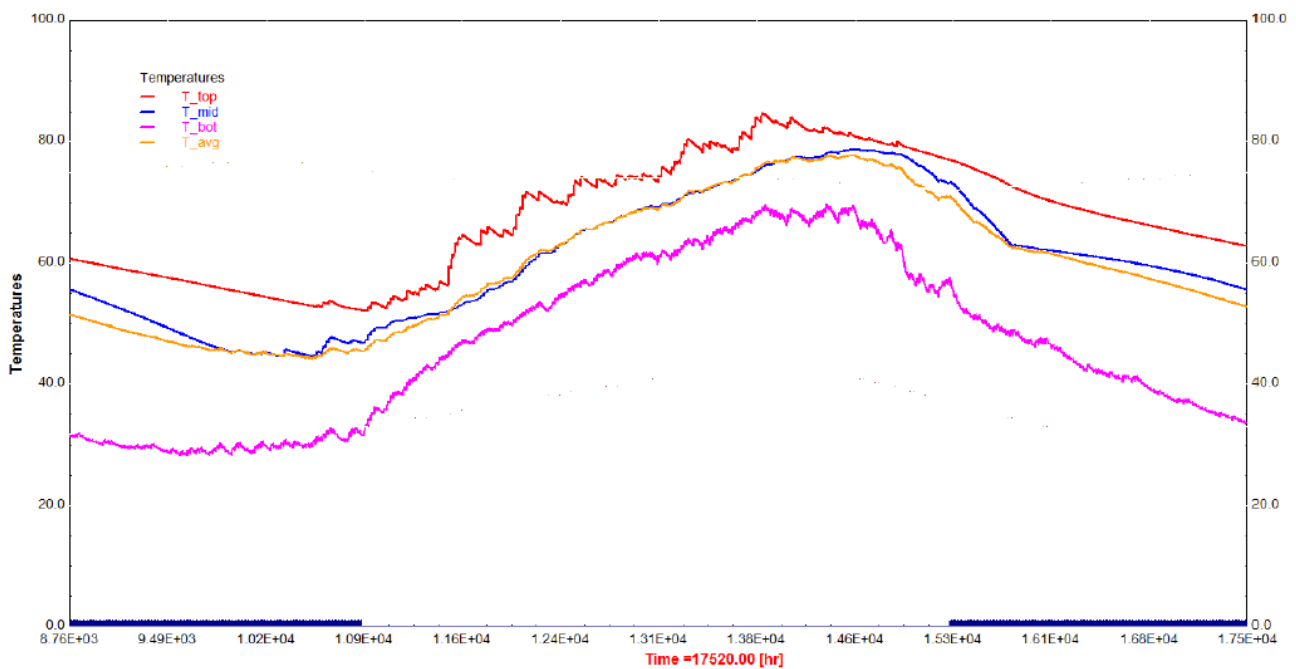
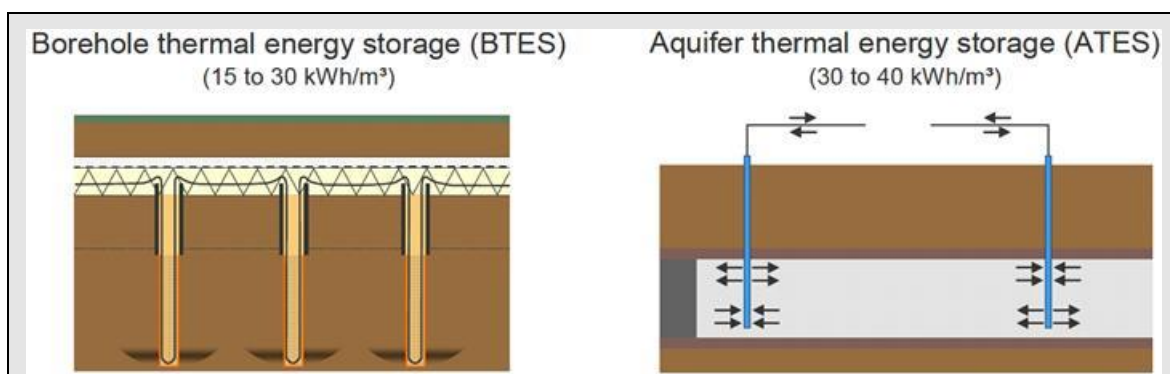


Figure 30 : Températures dans le stockage de Marstal (Danemark) la deuxième année après la mise en service.

4.2.2. Cas des stockages géothermiques dans les formations géologiques

Les deux technologies de stockage ci-dessous permettent toutes deux des capacités de stockage thermique égales ou supérieures à celui que peut procurer le Puits Y. Toutefois, on notera que la technologie en champs de sondes géothermiques (BTES) offre une capacité volumique deux fois moindre du fait des propriétés thermiques des roches moins favorables que celles de l'eau.

Pour la technologie de stockage en aquifère (ATES) les volumes pouvant être atteints sont bien supérieurs à celui du Puits Y, aussi, c'est la température qui est indiquée plutôt que le volume de stockage. En effet, le débit de stockage / déstockage est typiquement de 100 m³ et plus, ce qui, pour une durée de fonctionnement indicative de 2 000 heures peut potentiellement représenter des volumes de plus de 200 000 m³ transférés chaque saison. On notera néanmoins que l'opération de Rostock se limite à des volumes de l'ordre de 20 000 m³ par saison.



Stockages en champ de sondes géothermiques (BTES)

Localisation	Volume	Année
Neckarsulm, Allemagne	63 400 m ³	1997, 1998, 2001
Attenkirchen, Allemagne	9 850 m ³	2002
Crailsheim, Allemagne	37 500 m ³	2008
Okotoks, Canada	34 000 m ³	2007
Braedstrup, Danemark	17 000 m ³	2011

Stockages en aquifère (ATES)

Localisation	Température	Année
Utrecht, Pays-Bas	90°C	1991
Gouda, Pays-Bas	90°C	1998
Berlin, Allemagne	70°C (et 5 °C)	1999
Rostock, Allemagne	50 °C	2000
Neubrandenburg, Allemagne	70°C puis 95 °C	2004

Figure 31 : Quelques exemples de stockages géothermiques de type BTES et ATES

Pour ces quatre technologies présentées ci-dessus, une analyse des coûts d'investissement a été opérée il y a une petite dizaine d'années, essentiellement en lien avec les besoins de stockage dans le domaine du solaire thermique direct ou indirect (climatisation). Ces coûts sont synthétisés par le graphique reproduit ci-dessous.

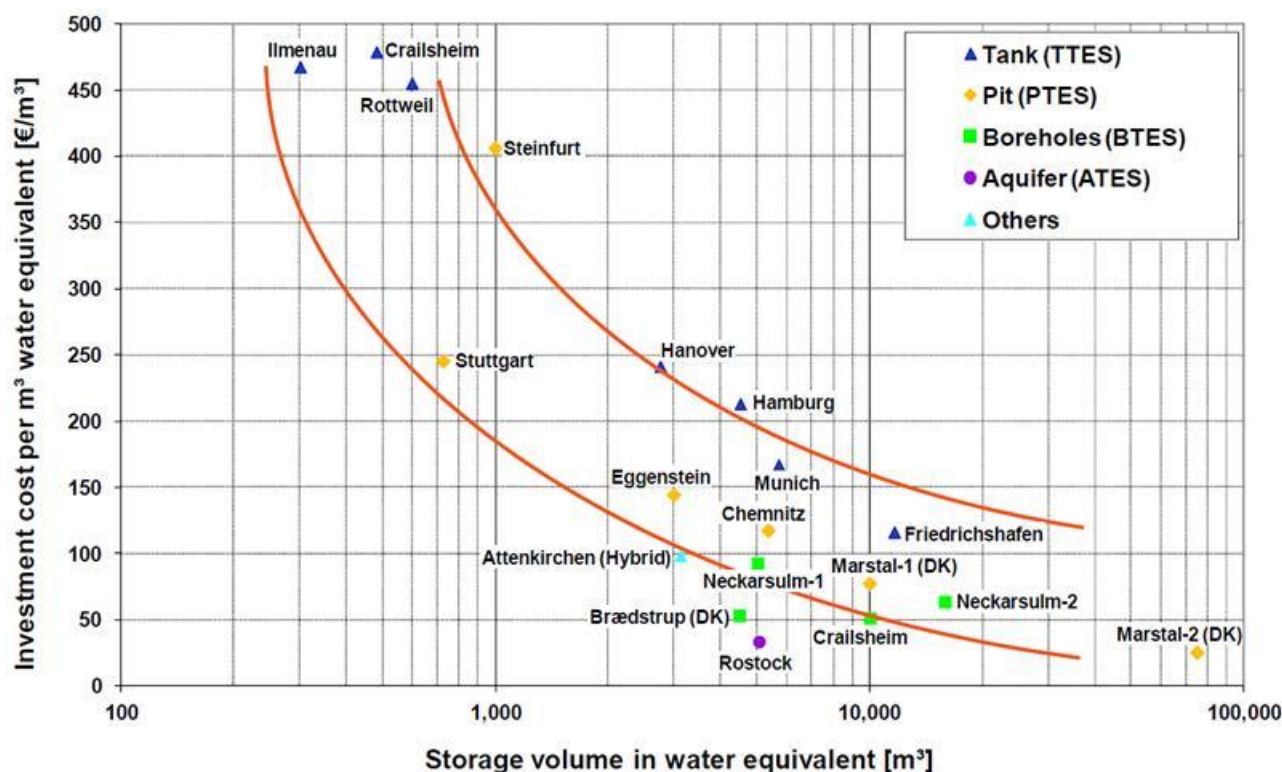


Figure 32 : Coûts d'investissement indicatif pour les quatre principales technologies de référence fonction du volume de stockage équivalent en eau

	TTES	PTES	BTES	ATES
Milieu de stockage	Eau	Gravier + Eau	Roches	Roches + Eau
Capacité thermique (kWh/m³)	60 à 80	30 à 50	15 à 30	30 à 40
Volume de stockage équivalent à 1 m³ d'eau	1	1.3 à 2	2 à 5	2 à 3

Figure 33 : Grandeurs comparatives pour les quatre technologies de stockage de référence

Ayant une puissance thermique indicative comparable à celle pouvant être envisagé à Gardanne, on peut considérer le stockage géothermique de type BTES récemment engagé pour le campus AIRBUS à Blagnac :

- 36 000 m² raccordés (terrain de 5 ha)
- Réseau d'énergie en boucle tempérée (3 bâtiments)
- Puissance du mode chaud 2 MW (dont 130 kW pour l'ECS)
Respectivement 1 144 MWh = 100% de la demande et 137 MWh (50%)
- Puissance du mode rafraîchissement 1 MW (1 071 MWh)
- 141 sondes géothermiques, 200 m de profondeur, espacées de 8 m, 3 champs
- Coût du champ de sondes géothermiques : 2 440 k€, soit 2,13 k€/kWh installé
- Coût de l'équipement pour le mode chaud : 700 k€ (dont ballons tampon)

- Coût de l'équipement pour le groupe froid : 340 k€ (10% du rafraichissement)
- Coût de la boucle d'eau tempérée : 528 k€
- Coût des prestations intellectuelles : 310 k€

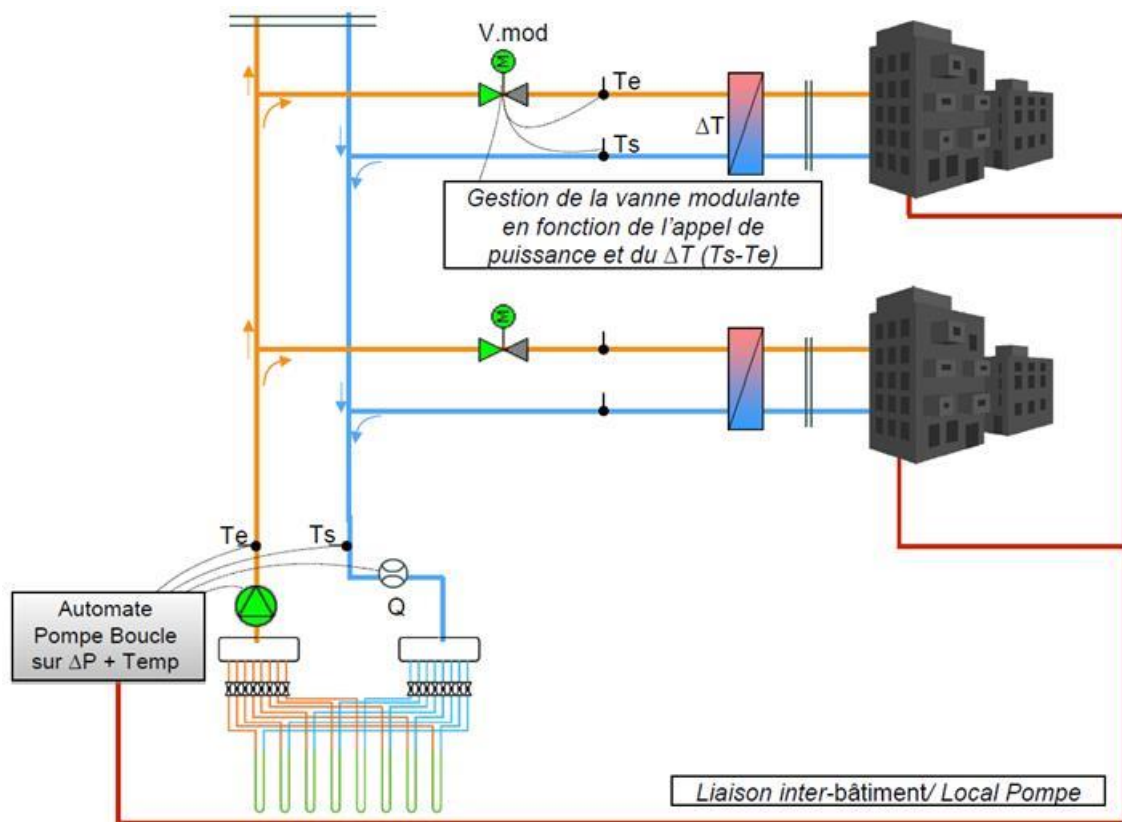


Figure 34 : Schéma logique du champ de sondes géothermiques, de la boucle tempérée et des organes de commandes pour le site du Campus Airbus à Blagnac

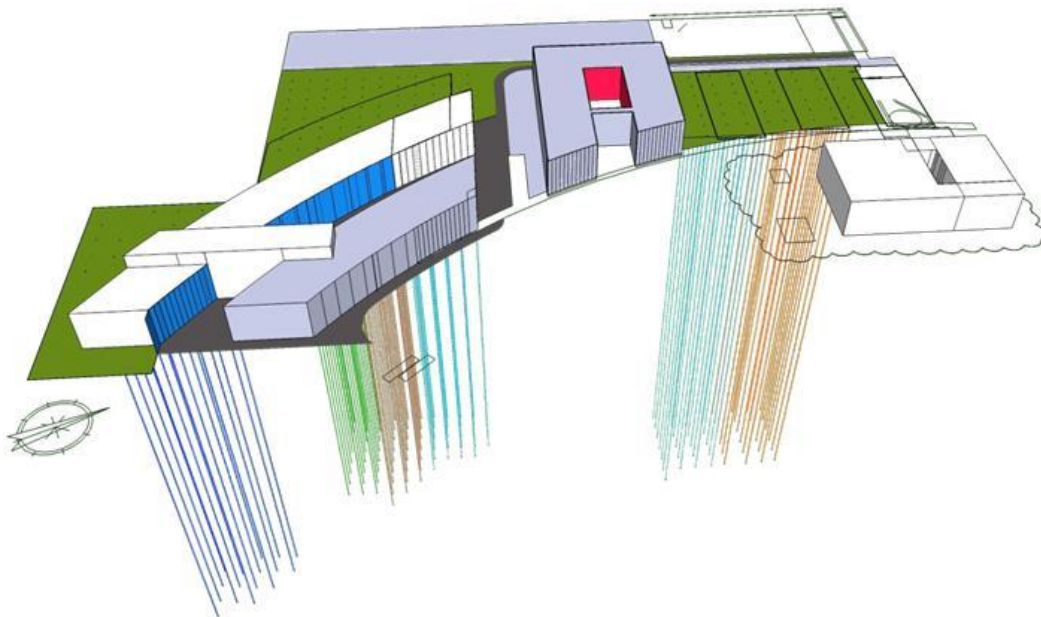


Figure 35 : Répartition inductive des sondes dans les 3 volumes du champ de sondes sur le site du Campus Airbus à Blagnac

5. Phase 1 : Options d'aménagement du Puits Y

5.1. PRESENTATION DES DIFFERENTES OPTIONS IDENTIFIEES

Du fait de l'étanchéité de son cuvelage, le Puits Y pourrait autoriser l'aménagement de deux segments distincts des points de vue hydrauliques et/ou thermiques. Quatre options sont envisageables (Figure 36) en notant toutefois que l'équipement le long des parois du Puits Y n'a pas été démantelé et que cela pourrait poser problème.

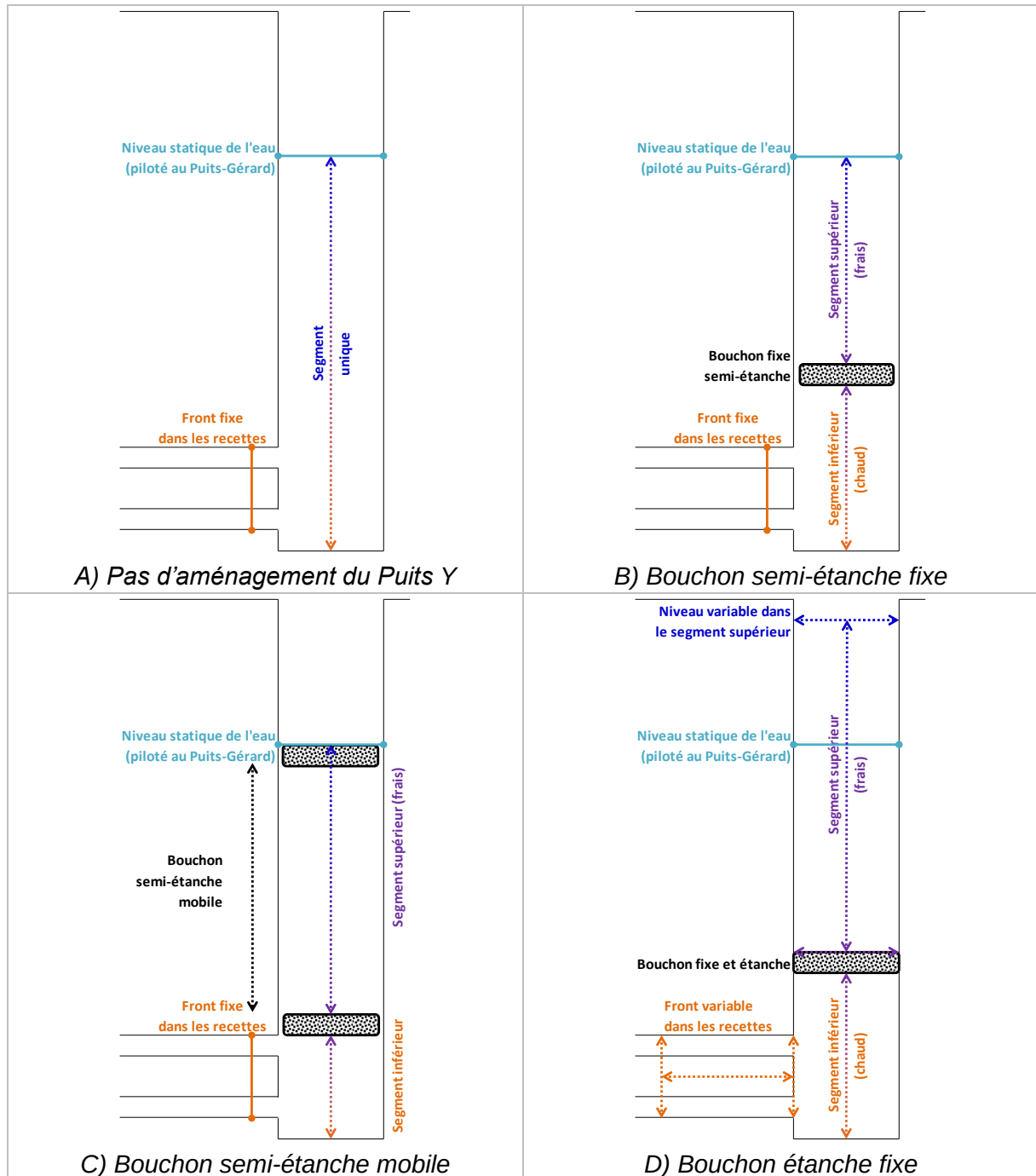


Figure 36 : Différentes configuration possibles dans le Puits Y, par ordre de complexité estimée.

5.1.1. Option d'aménagement A) - Pas d'aménagement du Puits Y

Forces	Faiblesse
- C'est la solution la moins onéreuse, du moins sur le papier, car il n'est pas à prévoir de moyen de contrôle de la convection thermique dans le puits. - Les deux solutions techniques "boucle semi-ouverte" et "boucle fermée" paraissent pouvoir être mises en œuvre	Cette solution semble peu propice à l'usage direct tant pour le chauffage que pour le rafraîchissement du fait d'une quasi obligation de gérer le volume comme un stock thermique devant alternativement servir pour le chauffage et pour le rafraîchissement.
Opportunités	Menaces
Cette option ménage la possibilité de pouvoir implanter des équipements autres que thermiques dans le Puit-Y, par exemple pour du stockage gravitaire.	Cette solution reste contrainte par les boucles de convection qui induisent une température relativement similaire sur toute la hauteur du puits Y. De ce fait, plus particulièrement dans les territoires du Sud de la France comme à Gardanne, la performance en mode rafraîchissement peut être insuffisante si l'exploitation n'a pas les capacités d'abaisser la température par anticipation.

Cette option d'aménagement paraît la plus réaliste techniquement mais elle procure des performances énergétiques qui restent contraintes par l'obligation de gérer simultanément la totalité du volume d'eau contenu dans le Puits Y ; ce qui limite un peu les écarts de température utilisables au risque de détériorer les coefficients de performance des machines thermodynamiques.

Néanmoins, la capacité inter-saisonnière du stockage thermique peut être évaluée à 1,3 GWh, c'est-à-dire pour la saison hivernale comme pour la saison estivale.

Cette configuration présente l'inconvénient d'une maîtrise imparfaite des éventuels phénomènes de convection dans le Puits Y ; ce qui a pour conséquence de ne pas faciliter l'optimisation des températures en fonction des besoins en surface. Pour être plus précis, il pourrait être difficile de produire des températures "fraîches", en deçà de 12°C à 15 °C, permettant un usage direct (sans pompe à chaleur) pour le rafraîchissement des locaux.

Au nombre des techniques géothermiques compatibles avec cette configuration, on peut plus particulièrement comptabiliser :

- La technique en Boucle Ouverte dite PACP
- La technique en Boucle Fermée, sondes coaxiale ou sondes en "U"

Nota : Cette solution présente l'intérêt de laisser totalement dégagé le volume du puits car les équipements géothermiques sont préférentiellement à répartir à la périphérie. Aussi, la question d'utiliser l'espace central cylindrique à d'autres fins reste posée et c'est notamment l'objet de la discussion esquissée au chapitre du même nom.

Variante : Une variante est identique à celle de la configuration B) consistant en un remplissage du volume ennoyé par un enrochement grossier afin de contrôler les boucles de convection mais au détriment de la capacité thermique.

5.1.2. Option d'aménagement B) - Bouchon semi-étanche fixe

Cette configuration a pour objectif la gestion de deux stocks thermiques : l'un plutôt plus frais en partie haute (par exemple entre 15 °C et 25 °C) et l'autre plutôt plus chaud en partie basse (par exemple entre 25 °C et 35 °C)

Forces	Faiblesse
- Techniquement, cette solution paraît réaliste, sous réserve que les équipements abandonnés le long des parois ne soient pas "mécaniquement" trop agressifs vis-à-vis des moyens d'obturation à concevoir. - Cette technique peut fonctionner en boucle ouverte ou en boucle fermée. - Les deux volumes de stockage doivent être thermiquement équilibrés à l'échelle annuelle. - Gérer deux niveaux de la température propices l'un et l'autre à de l'usage direct. Paraît possible.	- Des échanges parasites entre les deux espaces haut et bas du puits restent possibles. Il conviendra d'examiner des solutions spécifiques, par exemple par remblayage au-dessus d'un obturateur gonflable ; ce qui complique alors les éventuelles opérations de maintenance sur les moyens d'échange de chaleur - Les retours sur expériences manquent pour la mise au point des échangeurs optimisés pour l'hiver et pour l'été.
Opportunités	Menaces
Cette solution peut constituer un précédent pour d'autres configurations devant gérer deux stocks thermiques à deux températures différentes.	Cette solution est conditionnée par la capacité de réalisation à coût acceptable d'un obturateur efficace, gonflable ou mécanique, laissant le passage aux échangeurs de chaleur, notamment en ce qui concerne la mise en place même si une étanchéité parfaite n'est pas requise.

Cette configuration semble rester d'un niveau de complexité technique acceptable car il n'y a pas recherche d'une étanchéité parfaite au niveau de l'obturation ; l'objectif étant de restreindre significativement les échanges convectifs dans le sens vertical.

De la sorte, cette configuration pourrait étendre les capacités de gestion des températures en réponse aux besoins en surface. Pour être plus précis, il paraît envisageable, du moins en début de saison estivale, de produire des températures suffisamment "fraîches" pour un usage direct (sans pompe à chaleur), c'est-à-dire pour le rafraîchissement des locaux. Il en sera de même en début de saison hivernale mais pour du chauffage.

Pour être pleinement valorisée, cette solution imposerait une maîtrise de la répartition des échanges avec les deux stockages superposés ; ce qui peut nécessiter une adaptation des échangeurs de chaleur en surface et plusieurs profondeurs des équipements géothermiques implantés dans le Puits, donc des investissements supplémentaires.

Au nombre des techniques compatibles, on peut plus particulièrement comptabiliser :

- La technique en boucle ouverte dite PACP nécessitant un équipement par segment
- La technique en boucle fermée avec une préférence assez marquée pour les sondes coaxiales, notamment si elles bénéficient d'une isolation thermique du tube central.

Variantes : Une variante est identique à celle de la configuration A) consistant en un remplissage du volume ennoyé par un enrochement grossier afin de contrôler les boucles de convection mais au détriment de la capacité thermique.

5.1.3. Option d'aménagement C) - Bouchon semi-étanche mobile

Cette configuration a pour objectif d'amplifier le différentiel de température entre le stock en fin de saison hivernal et le stock en fin de saison estival ; sans pour autant diminuer la capacité de chacun des deux stocks comme en configuration B).

Forces	Faiblesse
- Cette configuration, si elle est jugée réalisable à coût acceptable, permettrait d'amplifier les quantités d'énergies manipulées d'une saison à l'autre en vidant complètement le stock chaud pendant la constitution hivernale du stock froid et inversement en été. - Le volume du puits est utilisé au maximum dans la limite imposée par le niveau statique contrôlé au Puits Gérard. Pour aller au-delà, il faudrait passer à la configuration D)	- Il y a obligation de pomper l'eau par la technique de la boucle (semi)ouverte ; ce qui peut imposer des charges de fonctionnement liés à la qualité de l'eau - Des équipements (faiblement) mobiles sont maintenus en activité dans le puits. - La température des roches fait le grand écart d'une saison à l'autre
Opportunités	Menaces
N/A	Si les équipements abandonnés le long des parois sont trop proéminents, il peut y avoir nécessité de procéder à leur démantèlement ; ce qui peut se révéler difficile

Cette configuration paraît d'un relativement faible niveau de complexité technique mais les travaux à prévoir peuvent être conséquents. Elle présente la particularité de reprendre les fonctionnalités initiales du Puits Y car elle recourt à un bouchon semi-étanche que l'on peut comparer avec la cage de 40 tonnes de capacité qui circulait dans le puits. Le principe de cette configuration est de permettre des tailles variables des stocks ; ce qui impose une solution technique de type PACP dont on peut évidemment inverser le sens de pompage :

- En saison hivernale, le pompage a lieu en partie basse (segment inférieur = stock chaud) et la réinjection de l'eau refroidie par la machinerie thermodynamique en partie haute (segment supérieur = Stock froid). Pendant cette période, l'obturateur est déplacé verticalement vers le bas, par exemple par treuillage
- En saison estivale, le pompage a lieu en partie haute (segment supérieur) et la réinjection de l'eau réchauffée par les groupes frigorifiques en partie basse (segment inférieur). Pendant cette période, l'obturateur est déplacé verticalement vers le haut pour compenser exactement le pompage.

Cette solution exploite le volume cylindrique sous le niveau statique piloté depuis le Puits Gérard. Des échanges thermiques restant possibles à la périphérie du bouchon, l'efficacité thermique n'est pas maximale. Par ailleurs, cette solution présente l'inconvénient de nécessiter la remise en fonctionnement des moyens de treuillage avec la difficulté supplémentaire de devoir gérer la corrosivité de l'eau.

Se pose alors le problème de l'équipement optimum en termes de séparation des stocks thermiques ; la question de l'ancrage des équipements de pompage de type PACP le long des parois restant posée. Des travaux conséquents peuvent alors être à envisager.

5.1.4. Option d'aménagement D) - Bouchon étanche fixe

Cette configuration aurait pour objectif la maximisation des volumes d'un stock frais et d'un stock chaud ; ce dernier pouvant alors être constitué dans les galeries et recettes qui sont localisées en profondeur au voisinage immédiat du Puits Y.

Forces	Faiblesse
- Sur le papier, c'est la solution permet de maximiser la taille des stocks thermiques. - Cette solution est compatible avec les techniques en boucle ouverte et en boucle fermée en notant toutefois que l'option "boucle ouverte" est obligatoire s'il est fait le choix de transférer de l'eau d'un stock vers l'autre selon les saisons	- Cette solution est conditionnée par l'obligation de réaliser une très bonne étanchéité du bouchon ; lequel doit être traversé par les équipements thermiques de gestion du stock chaud. - L'existence de pompes aptes n'est pas confirmée si le bouchon étanche est placé très profond. - La transmissivité dans les anciennes recettes et galeries concernées par les flux hydraulique est supposée bonne.
Opportunités	Menaces
N/A	- Les autres solutions sont plus simples - Cette configuration est la plus complexe car elle impose l'étanchéité tant du bouchon que des parois du Puits Y. - Cette configuration est celle où les efforts sur les composants sont les plus importants puisque l'enjeu est de pouvoir monter le niveau du puits dans sa partie supérieure et/ou le baisser. En particulier, les pompes peuvent être à envoyer à grande profondeur.

L'intérêt de cette configuration, si elle était jugée techniquement et économiquement faisable, serait d'autoriser un volume de stockage exploitant toute la hauteur du Puits Y et non pas seulement la hauteur d'eau contraint par le niveau statique qui est imposé par le pompage au Puits Gérard. De ce fait, une hauteur d'eau de pratiquement 300 m supplémentaire pourrait être envisagée, Ainsi :

- Le stock froid serait constitué au-dessus du bouchon étanche ; lequel stock est pratiquement vidé en fin de saison estivale et pratiquement rempli en fin de saison hivernale. En première approche, le volume utile pourrait dépasser 75 000 m³ et la température de l'eau pourrait être inférieure à 15 °C
- Le stock chaud sous le bouchon pourrait à l'extrême être constitué exclusivement dans les deux recettes et dans les galeries et autres cavités minières localisées au voisinage immédiat du fond du Puits Y. Le volume pratique est alors exactement le même que celui du stock froid. Par contre, la température du stock chaud pourrait dépasser continument 35 °C.

Possibles variantes : Cette solution semble présenter au moins deux variantes

- **Solution basée sur des échangeurs en boucle fermées**, préférentiellement de type coaxial. Il s'agit alors d'une variante de la configuration B) mais où le stock froid est étendu vers le haut et le stock chaud adapté en conséquence, soit un gain théorique de volume, et donc de capacité thermique, supérieur à 37%.
- **Solutions basées sur des échangeurs en boucle ouverte** de type PACP :
 - Le premier cas consiste à maintenir les volumes hydrauliques entre les stocks inférieurs et supérieurs. Dans ce cas, il s'agit d'une variante de la solution en boucle fermée ci-dessus et les volumes des stocks sont identiques.
 - Le second cas vise la maximisation des volumes des stocks.

Sur le principe, le stock supérieur est pratiquement vidé en fin de saison estivale et pratiquement rempli en fin de saison hivernale.

Le stock inférieur se répand dans les recettes et galeries en fond du Puits Y.

En première approche, le volume utile du stock supérieur pourrait dépasser 75 000 m³ et la température de l'eau pourrait y être inférieure à 15 °C en fin de saison hivernale.

Pour les deux stocks, les pompes pourraient être à envoyer à grande profondeur, plus particulièrement la pompe du stock supérieur qui ne peut bénéficier de la hauteur statique imposée par le pompage au Puits- Gérard. Une colonne d'eau au-dessus de la pompe de l'ordre de 1 000 m serait alors constatée, et la pompe aurait à procurer plus de 100 à 120 bars de pression de refoulement.

Nota : Pour la dernière hypothèse ci-dessus, il y a nécessité d'organiser un mouvement saisonnier d'eau dans les recettes et galeries avoisinantes si le choix est fait de vider complètement le stock froid ; lequel mouvement d'eau (75 000 m³ au grand maximum) resterait malgré tout faible au regard du pompage permanent opéré au Puits Gérard.

Outre les contraintes relatives aux moyens de pompage, il ne faut alors pas négliger la difficulté technique résidant dans la résistance à la pression différentielle du bouchon étanche, surtout en fin de saison estivale lorsque le stock froid est pratiquement vide, pouvant pratiquement amener le niveau d'eau vers -800 m NGF.

5.2. EXPRESSION DES CONDITIONS DE REFERENCE POUR L'EXPLOITATION

5.2.1. Préambule

Sans prétendre représenter la solution technique qui pourrait être in fine mise en place dans le Puits Y, ce chapitre exprime comment sont construites les conditions de référence, incluant le système thermique, pour pouvoir comparer toutes les variantes examinées.

Tout d'abord, il est important de conserver à l'esprit les contraintes suivantes :

1. Le niveau de la température dans le Puits Y, essentiellement de l'eau, fait que **l'utilisation du Puits Y est plus favorable à des applications de chauffage qu'à des applications de rafraîchissement**. En particulier, une température qui excéderait sensiblement 30 °C pourrait défavoriser la performance énergétique des groupes frigorifiques.
2. **Les demandes et rejets thermiques cumulés à l'échelle du projet de la ZA Morandat sont déséquilibrés ; les rejets issus du rafraîchissement étant supérieurs aux puisages pour le chauffage**. Sauf à limiter l'utilisation thermique du Puits Y, la recherche d'un rééquilibrage vers les besoins en chaleur est à privilégier.

5.2.2. Energie disponible dans le Puits Y et Convention de comptabilisation de l'énergie thermique échangée avec le Puits Y

En accord avec l'estimation présentée dans le Tableau 1 du chapitre 3.5.4, il est proposé de considérer qu'un ΔT de 15 °C dans le Puits Y représente un stock d'énergie thermique de l'ordre de 1 300 MWh (1,3 GWh). Par convention, les énergies échangées avec le Puits Y sont comptabilisées du point de vue de la chaleur apportée à l'utilisateur. Ainsi :

- Sont comptabilisées positivement les énergies thermiques puisées dans le Puits Y qui correspondent aux périodes durant lesquelles les demandes pour les applications de chauffage et de production d'ECS sont majoritaires.
- Sont comptabilisées négativement les énergies thermiques rejetées dans le Puits Y qui correspondent aux excédents thermiques lorsque les demandes pour le rafraîchissement des locaux ou des équipements sont majoritaires.

5.2.3. Profils météorologiques sur le secteur de la ZA Morandat

La prise en considération du profil météorologique moyen est une clef essentielle pour procéder à la répartition des demandes annuelles prévisionnelles telles qu'estimées en application de la réglementation thermique RT-2012 par le bureau d'étude BG.

Dans le cadre de la présente étude de préféabilité amont, on retient une répartition mensuelle des demandes énergétiques pour effectuer des simulations. Les données météorologiques utilisées sont celles de l'aéroport de Marignane corrigée de l'altitude, soit approximativement 200 m ce qui conduit à corriger les températures mesurées sur la station de -1,3°C.

Ces données fournissent les DJU mesurés pour le chauffage (à 18°C) et pour la climatisation (à 10 °C pour le tertiaire) ; ces DJU étant recalculés pour compenser la différence d'altitude. De même, est calculé à titre indicatif pour la présente étude un DJU pour le rafraîchissement qui est référencé à 18°C. Les demandes énergétiques annuelles ci-dessus sont alors réparties en fonction des mois de l'année au prorata des DJU.

Remarque : Une fois corrigées de l'altitude, l'observation comparative des DJU pour le chauffage et pour la climatisation fait ressortir des besoins thermiques du même ordre de

grandeur, respectivement 1908°C.j pour le chauffage et 1767°C.j pour la climatisation. Du point de vue de la géothermie exploitée au travers de pompes à chaleurs, cette observation incite à surveiller de près tout risque de déséquilibre car :

- Pour le mode climatisation, à l'énergie frigorifique doit être additionnée l'énergie électrique nécessaire pour actionner le compresseur, soit environ 20% à 25% ; le cumul des deux composante constituant le rejet thermique.
- Pour le mode chaud, l'énergie finale est fournie pour environ 20% à 25% par l'énergie électrique nécessaire pour actionner le compresseur. Cela diminue d'autant le puisage d'énergie thermique.

	Température de l'air		Température du sol		DJU chauffage (18°C)		DJU climatisation (10 °C)		DJU-Frais
	Station	Corrigé	Station	Corrigé	Station	Corrigé	Station	Corrigé	à 18°C
	°C	°C	°C	°C	°C-j	°C-j	°C-j	°C-j	°C-j
Janvier	6.70	5.40	7.34	6.04	350.30	378.00	0.00	0.00	0.00
Février	7.50	6.20	8.01	6.71	294.00	354.00	0.00	0.00	0.00
Mars	10.70	9.40	10.33	9.03	226.30	258.00	21.70	0.00	0.00
Avril	13.40	12.10	12.40	11.10	138.00	177.00	102.00	63.00	0.00
Mai	17.80	16.50	16.53	15.23	6.20	45.00	241.80	195.00	0.00
Juin	21.60	20.30	20.35	19.05	0.00	0.00	348.00	309.00	69.00
Juillet	24.60	23.30	23.04	21.74	0.00	0.00	452.60	399.00	159.00
Août	24.10	22.80	23.27	21.97	0.00	0.00	437.10	384.00	144.00
Septembre	20.20	18.90	19.83	18.53	0.00	0.00	306.00	267.00	27.00
Octobre	16.30	15.00	15.95	14.65	52.70	90.00	195.30	150.00	0.00
Novembre	10.80	9.50	11.22	9.92	216.00	255.00	24.00	0.00	0.00
Décembre	7.60	6.30	8.38	7.08	322.40	351.00	0.00	0.00	0.00
Année	15.16	13.86	14.76	13.46	1 605.90	1908.00	2 128.50	1767.00	399.00

Figure 37 : Données météorologique de la station de Marignane et corrections dues à l'altitude pour Gardanne

	DJU chauffage (18°C)		DJU climatisation (10 °C)		DJU-Frais	
	%	°C-j	%	°C-j	%	°C-j
Janvier	19.81%	378.00	0.00%	0.00	0.00%	0.00
Février	18.55%	354.00	0.00%	0.00	0.00%	0.00
Mars	13.52%	258.00	0.00%	0.00	0.00%	0.00
Avril	9.28%	177.00	3.57%	63.00	0.00%	0.00
Mai	2.36%	45.00	11.04%	195.00	0.00%	0.00
Juin	0.00%	0.00	17.49%	309.00	17.29%	69.00
Juillet	0.00%	0.00	22.58%	399.00	39.85%	159.00
Août	0.00%	0.00	21.73%	384.00	36.09%	144.00
Septembre	0.00%	0.00	15.11%	267.00	6.77%	27.00
Octobre	4.72%	90.00	8.49%	150.00	0.00%	0.00
Novembre	13.36%	255.00	0.00%	0.00	0.00%	0.00
Décembre	18.40%	351.00	0.00%	0.00	0.00%	0.00
Année	100%	1908.00	100%	1767.00	100%	399.00

Figure 38 : Repartition des demandes énergétiques sur une année

5.2.4. Expression des demandes thermiques de référence

Comme introduit précédemment, les demandes thermiques sont celles de la ZA Morandat.

En accord avec les pièces transmises par la SEMAG, on considère dans la présente étude que les surfaces de plancher seront *a minima* de 48 000 m² de plancher et au nominal de l'ordre de 65 000 m², cela en incluant les constructions existantes dite rénovées, dont le Pôle Multiculturel, qui représentent typiquement 5 implantations et les constructions neuves en projet représentant 24 implantations.

m ² de plancher	Tranche 1	Tranche 2	Tranche 3	Totaux
Tertiaire rénové	1 060	0	0	1 060
Entreposage et archivage	640	0	0	640
Centre-Multi-Culturel (rénovation)	0	0	4 440	4 440
Hôtellerie	0	0	3 500	3 500
Tertiaire en rafraîchissement direct	0	0	0	0
Tertiaire neuf	13 404	13 908	9 669	36 981
Hôtel d'entreprises	1 800	0	0	1 800
Totaux	16 904	13 908	17 609	48 481

Figure 39 : Synthèse des surfaces de plancher *a minima* et par tranche de construction de la ZA Morandat

Pour ces surfaces de plancher déjà bâties ou en projet à court terme sur la ZA Morandat, sont affectées des demandes énergétiques annuelles exprimées en kWh/m².an et correspondant à des énergies finales, c'est-à-dire les énergies réellement utiles pour le confort thermique et non pas les énergies primaires.

Hormis l'ECS ajouté, les demandes énergétiques ci-dessous sont celles proposées par le bureau d'étude BG pour la ZA Morandat. Les demandes indiquées pour les logements et pour l'enseignement correspondent à deux catégories de bâtiments qui ne seront pas présentes sur zone mais qui, plus loin dans le présent document, sont utilisées "virtuellement" pour examiner la sensibilité du système à la forme de la demande thermique.

Evidemment toutes les valeurs dans le tableau ci-dessous sont discutables dans le détail, en particulier la performance retenue pour l'Hôtel d'Entreprises en raison de son équipement avec stockage de type Cristopia, mais ce n'est pas l'objet de la présente section.

Demandes thermiques utiles du bâti retenues pour l'étude				
	Chauffage kWh/m ² .an	ECS kWh/m ² .an	Frais direct kWh/m ² .an	Froid kWh/m ² .an
Tertiaire rénové	40	5	0	50
Entreposage	40	0	0	0
Centre-Multi-Culturel	40	5	10	0
Hôtellerie	20	20	0	25
Tertiaire-Rafraichi	20	5	10	0
Tertiaire neuf	20	5	0	25
Hôtel Entreprises	40	5	0	25

Figure 40 : Demandes énergétiques annuelles spécifiques, exprimées en énergie utile, retenues pour constituer la solution de référence

5.2.5. Réseau de distribution de référence

Nature du réseau : Réseau 2 tubes

Le réseau de distribution de référence est un réseau 2 tubes en boucle tempérée, c'est-à-dire avec des machineries thermodynamiques réparties le long du réseau ; ce qui, par exemple, peut représenter un total d'une trentaine de machineries si on considère que chaque bâtiment dispose de sa propre machinerie.

Cette morphologie de réseau est celle retenue en base par BG dans son étude. C'est également celle du réseau du Fort d'Issy qui peut être prise en exemple.

Nota : Dans la présente étude, il n'est pas fait d'hypothèse sur le pilotage de la circulation dans le réseau en boucle tempérée (Figure 41) ; la question pouvant surtout se poser en intersaison.

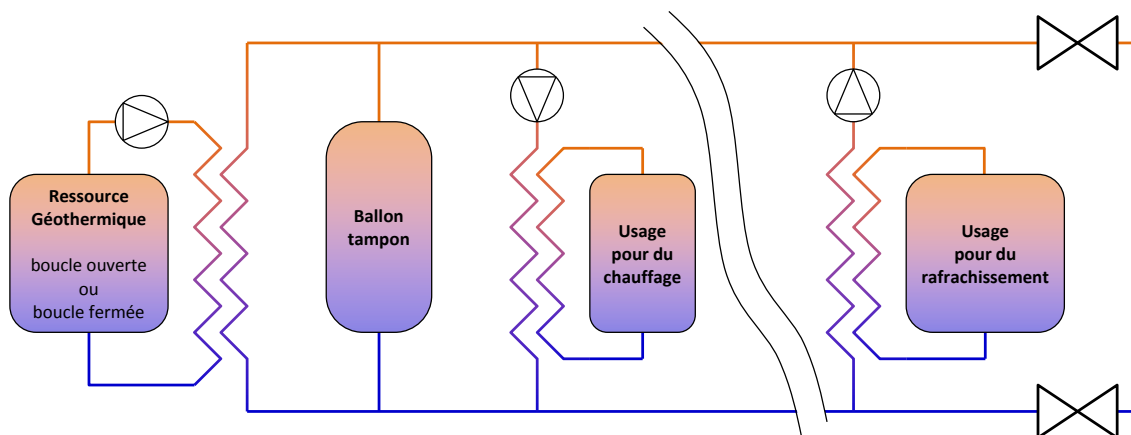


Figure 41 : Morphologie retenue en référence pour le réseau de la ZA Morandat

Paramètres du réseau en boucle tempérée : 28°C ⇔ 13°C

Tout comme, par exemple pour le réseau du Fort d'Issy, la température nominale de départ réseau est prise de l'ordre de 28°C ; cette température étant celle estimée à court terme et considérée comme étant homogène dans le Puits Y. Egalement en référence au réseau du Fort d'Issy, la température de retour nominale, en mode chauffage hivernal, pourrait être de l'ordre de 13°C ; ce qui correspond alors à un ΔT moyen de 15 °C résultant des échanges opérés au niveau des sous-stations réparties.

Nota : Par simplification, ce ΔT de 15 °C représente également la valeur de référence admise pour l'abaissement de la température dans le Puits Y en fin de saison de chauffage, c'est-à-dire en avril / mai de chaque année.

Mode de fonctionnement des machineries thermodynamiques

Chacune des machineries réparties le long du réseau est supposée apte à optimiser en propre son fonctionnement, c'est-à-dire sa consommation d'énergie électrique.

Techniquement, il s'agit donc, outre les échangeurs de chaleur avec le réseau en boucle tempérée, d'agencements de type thermofrigopompes combinés à des ballons de stockages en cycle courts, d'une part pour le chauffage et l'ECS et d'autre part pour la climatisation (Figure 42). Outre une consommation électrique optimisée, une telle machinerie se caractérise par des échanges thermiques limités avec le réseau en boucle tempérée.

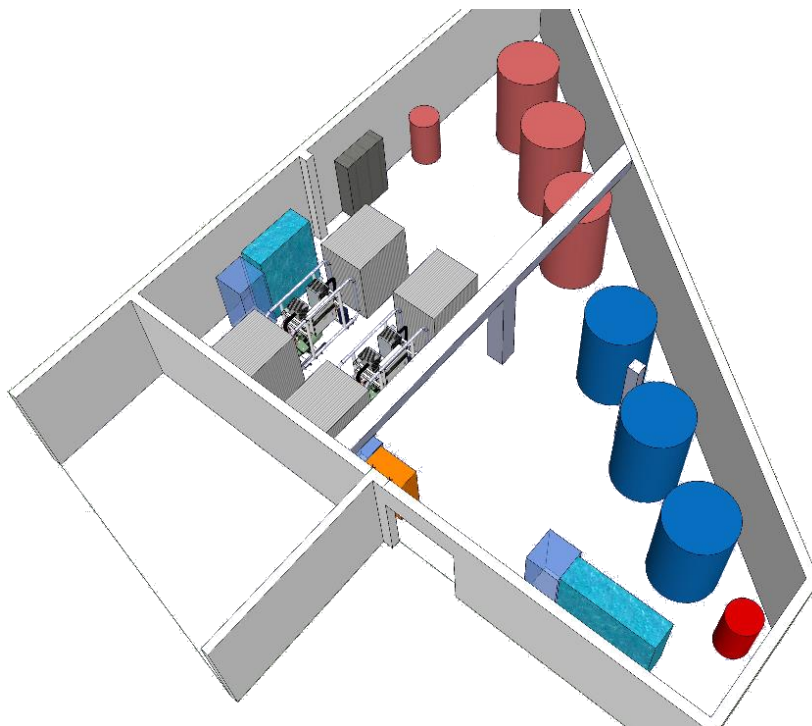


Figure 42 : Exemple de machinerie thermodynamique adaptée aux réseaux en boucle tempérée
(Source : Campus Airbus à Blagnac)

Synthétiquement, les excédents de chaud ou de froid sont prioritairement revalorisés directement au niveau de la sous-station de sorte que n'est en fait échangé avec le réseau en boucle tempérée que l'énergie thermique résiduelle, à savoir un puisage de chaleur en période hivernal et un rejet de chaleur en période estivale. Pour les saisons intermédiaires, les échanges restent fonction de la météorologie mais peuvent être extrêmement limités, voire proche de zéro en bilan mensuel.

Concrètement dans le cadre de la présente étude, le fonctionnement de ce type de machinerie se prend en compte en combinant tous les besoins gérés par une machinerie donnée, c'est-à-dire en additionnant ou soustrayant directement au niveau de chaque sous-station les puisages et rejets thermiques mensuelles conformément à la convention ci-dessus.

De la sorte, le bilan énergétique mensuel des échanges opérés avec le Puits Y évite la comptabilisation des énergies qui peuvent être directement revalorisées au niveau de chacune des sous-stations moyennant des stockages court-terme (réservoirs tampon) adéquats.

Important : La présente étude ne fait aucune hypothèse sur le nombre des sous-stations. En première approche, on peut considérer que le nombre minimum de sous-stations pourrait être du même ordre de grandeur que le nombre de tranches, soit 3 sous-stations, et au maximum égal au nombre de bâtiments, soit de l'ordre de 25.

5.2.6. Durées de fonctionnement des équipements

La durée de fonctionnement des équipements est primordiale lorsqu'il s'agit de pompes à chaleur ou de groupes frigorifiques pour lesquelles il est préférable de privilégier les temps de fonctionnement longs vis-à-vis des cycles courts qui tendent à accélérer leur vieillissement.

Economiquement, l'intérêt réside également dans le dimensionnement d'équipements dont les puissances installées sont limitées ; ce qui revient à également limiter les investissements. Ce

constat est vrai pour les machines thermodynamiques comme pour les équipements géothermiques.

Techniquement, cette approche implique la mise en place de ballons tampon pour le stockage court-terme ; ce qui est d'ailleurs déjà mis en pratique sur la ZA Morandat où un stockage de type CRISTOPIA (Groupe-CIAT) équipe la production de froid pour l'hôtel d'entreprise.

Dans son étude, BG avait ainsi proposé un maximum de 20 heures de fonctionnement par jour pour le mode climatisation.

Dans la présente étude, une disposition du même ordre est conservée, à savoir une durée fonctionnement au nominal de 2/3 à 3/4 du temps pour le mois le plus exigeant du point de vue des échanges thermiques avec le Puits Y, en l'occurrence les mois de juillet et d'août, même sans présence d'un Data-Center.

On retiendra donc :

- La durée mensuelle de fonctionnement cumulée au régime nominal est de l'ordre de 496 à 558 heures sur un total de 744 heures en juillet.
- La réserve de disponibilité de 1/4 à 1/3 du temps permet de faire face aux conditions exceptionnelles, soit 186 à 248 heures de fonctionnement sur 744 heures en juillet.

Important : Le temps de fonctionnement ci-dessus correspond au temps de fonctionnement des équipements lorsqu'ils fonctionnent au régime nominal ; le fonctionnement réel pouvant évidemment recourir à une variation continue pour s'adapter aux modulations de la demande.

Du point de vue du comportement thermique du Puits Y, de tels variations du débit ou de la puissance instantanée sont pratiquement sans incidence perceptible puisque les quantités d'énergie échangées sont les mêmes.

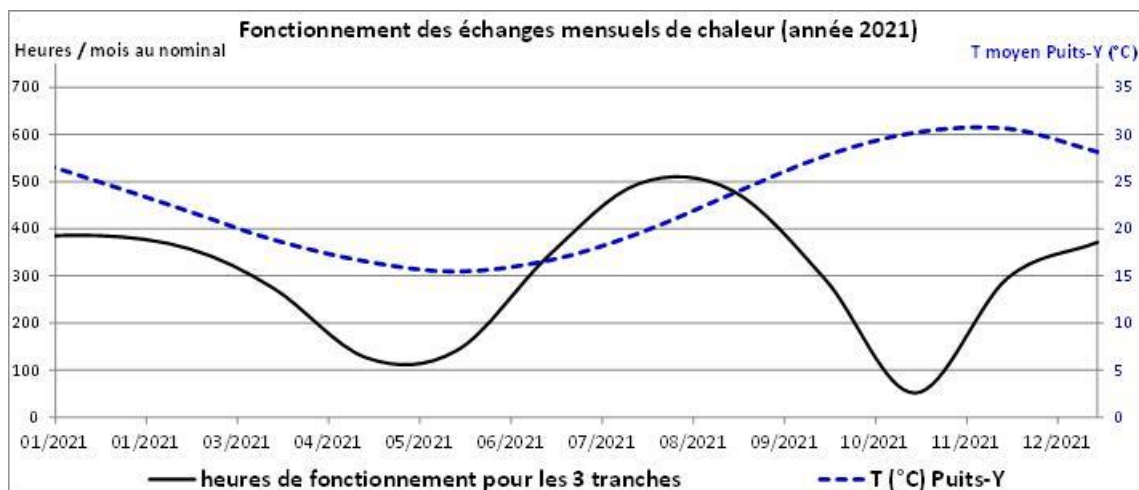


Figure 43 : Exemple de temps de fonctionnement au régime nominal pour la ZA Morandat

A retenir : Le fait d'imposer une durée longue du fonctionnement au régime nominal équivaut à diminuer les débits nominaux / maximaux de fluide caloporteur, tant pour les échanges avec le Puits Y que pour la distribution dans le réseau en boucle tempérée. Cela équivaut donc à limiter la taille de ces équipements, et donc des investissements afférents.

Dans le Puits Y, sont concernés les échangeurs envoyées et/ou les dispositifs de pompage / réinjection.

5.3. EXAMEN DE LA CONFIGURATION A)

- Aucun aménagement dans le Puits Y ennoyé sur environ 800 m
- Maintien de la température du Puits Y sous 30-32 °C au maximum par alternance équilibrée entre chauffage hivernal et rafraîchissement estival
- Chauffage par pompes à chaleur et rafraîchissement par groupes frigorifiques
- Distribution en réseau "2 tubes" de type "boucle tempérée"
- Départ 30-32°C en début de saison hivernale - Retour 13-15 °C en fin de saison
- Départ 13-15 °C en début de saison estivale - Retour 30-32 °C en fin de saison
- Echanges thermiques Hiver / Eté équilibrés : jusqu'à 1 300 MWh $\Leftrightarrow$ 15 °C de ΔT

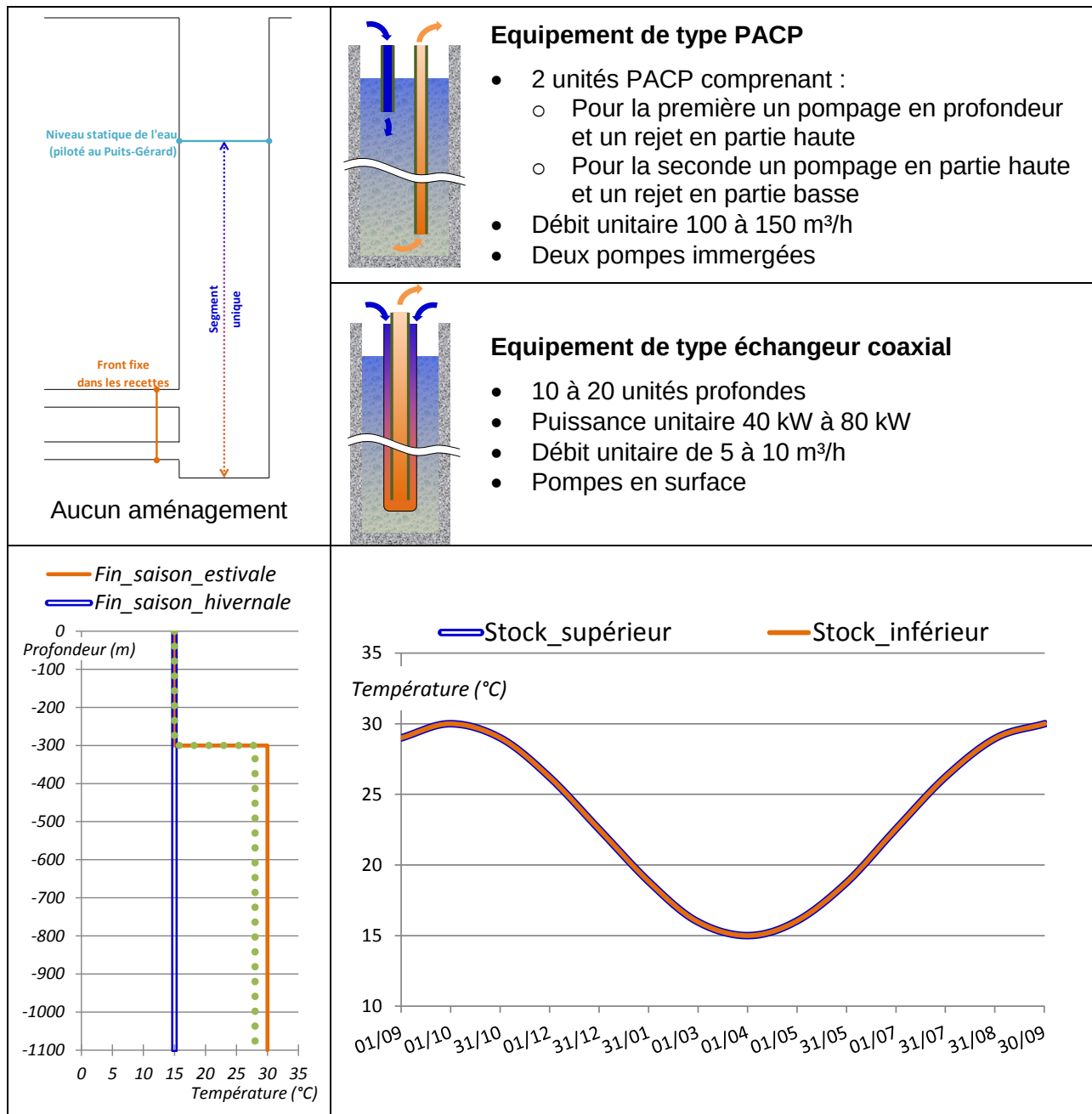


Figure 44 : Caractéristiques indicatives de la configuration A) d'aménagement du Puits Y

La configuration technique de référence (Figure 44) pour les échanges de chaleur dans le Puits Y est une absence d'aménagement du Puits et un équipement pour les échanges thermiques pouvant être :

- 1) des dispositifs de pompage / réinjection de type PACP
- 2) des échangeurs de chaleur ennoyés, a priori de type "coaxial".

5.3.1. Investigations pour une surface *a minima* de 48 000 m²

Présentation

Les hypothèses pour le calcul des demandes thermiques et pour les échanges d'énergie thermiques avec le Puits Y sont celles détaillées ci-dessus dans le présent chapitre qui intègre trois phases d'aménagement pour atteindre un total de l'ordre de 48 000 m², y compris les 8 000 m² existants.

Les estimations ci-dessous considèrent le raccordement de tous les locaux considérés ; ce qui reste une hypothèse de travail dans la mesure où certains de ces locaux ne peuvent être que difficilement modifiés pour être raccordés à un réseau d'énergie, tant pour le chauffage que pour l'eau chaude sanitaire. C'est en particulier le cas des systèmes exploitant la technique de la détente directe pour la distribution intérieure (locaux de BRGM/DPSM en particulier).

Néanmoins, cette hypothèse de travail est représentative des contraintes imposées par le Puits Y qui, du fait de sa configuration, doit avant tout être considéré comme étant un stock thermique permettant le stockage inter-saisonnier des énergies excédentaires ; à savoir :

- La chaleur excédentaire rejetée par les climatisations en période estivale
- L'énergie à basse température produite par les pompes à chaleur en période hivernale.

A retenir : Impérativement, les quantités puisées en période hivernale doivent être compensées par les rejets des climatisations (ou équivalent) en période estivale.

Raccordement des 3 tranches de la ZA Morandat pour le chauffage et pour la climatisation à hauteur de 48 000 m²

Le présent cas de figure considère les demandes spécifiques en énergie utiles de référence définies précédemment (Tableau 2).

Ainsi, tous les bâtiments rénovés présentent de fortes demandes en climatisation hormis l'hôtel d'entreprises qui a été considéré comme étant au niveau de performance des bâtiments neufs.

Demandes thermiques utiles du bâti retenues pour l'étude				
	Chauffage kWh/m ² .an	ECS kWh/m ² .an	Frais direct kWh/m ² .an	Froid kWh/m ² .an
Tertiaire rénové	40	5	0	50
Entreposage	40	0	0	0
Centre-Multi-Culturel	40	5	10	0
Hôtellerie	20	20	0	25
Tertiaire-Rafrica	20	5	10	0
Tertiaire neuf	20	5	0	25
Hôtel Entreprises	40	5	0	25

Tableau 2 : Demandes annuelles spécifiques en énergie utile – Hypothèses de référence

En prenant en considération les surfaces raccordées, les demandes annuelles, exprimées en énergies utiles, sont répertoriées dans le Tableau 3 ci-dessous.

	Surfaces m ²	Chauffage MWh/an	ECS MWh/an	Frais direct MWh/an	Froid MWh/an
Tertiaire rénové	1 060	42	5	0	53
Entreposage	640	26	0	0	0
Centre-Multi-Culturel	4 440	178	22	44	0
Hôtellerie	3 500	70	70	0	88
Tertiaire-Rafrachi	0	0	0	0	0
Tertiaire neuf	36 981	740	185	0	925
Hôtel Entreprises	1 800	72	9	0	45
Totaux	48 421	1 127	291	44	1 110

Tableau 3 : Demandes annuelles cumulées en énergie utile – Hypothèses de références

Selon les hypothèses détaillées plus-avant portant sur trois phases d'aménagement pour atteindre un total de 48 000 m², le raccordement de tous les locaux pour l'ensemble des services thermique, le calcul estimatif met en évidence une dérive progressive de la température dans le Puits Y (Figure 46) du fait de rejets de chaleur issus des climatisations plus importants que les puisages pour le chauffage comme synthétisé par le Tableau 4 ci-dessous.

Le détail au fil des cinq premières années d'exploitation est indiqué en Figure 45 où est également indiquée une estimation du débit d'eau calculée en estimant le ΔT à 7°C entre injection et pompage.

	Système de référence 48 000 m ²	
	Hiver (MWh/an)	Été (MWh/an)
Année N	108.4	-108.0
Année N+1	326.6	-482.8
Année N+2	560.4	-884.6
Année N+3	964.4	-1 287.6
Année N+4	982.3	-1 328.1

Tableau 4 : Constat de déséquilibre des échanges thermiques à cinq ans

L'étude du présent cas de figure conduit à constater l'inadéquation entre la répartition des besoins de la ZA Morandat et les aptitudes thermiques d'un système comme le Puits Y nécessitant un équilibre entre puisages et réinjections.

Dès l'achèvement du programme de construction, le déséquilibre conduisant à une surchauffe du Puits Y serait de l'ordre de 0,3 GWh par an.

Il est ici rappelé que l'obligation d'équilibrages des puisages et réinjection thermiques provient du fait que le Puits Y constitue un système fermé du point de vue thermique ne pouvant bénéficier de compensations hydrauliques en raison de sa bonne étanchéité et des recettes localisées exclusivement en partie basse du Puits Y et du réseau de galeries et qui ne peuvent donc être le siège d'aucune circulation pouvant transporter de l'énergie thermique.

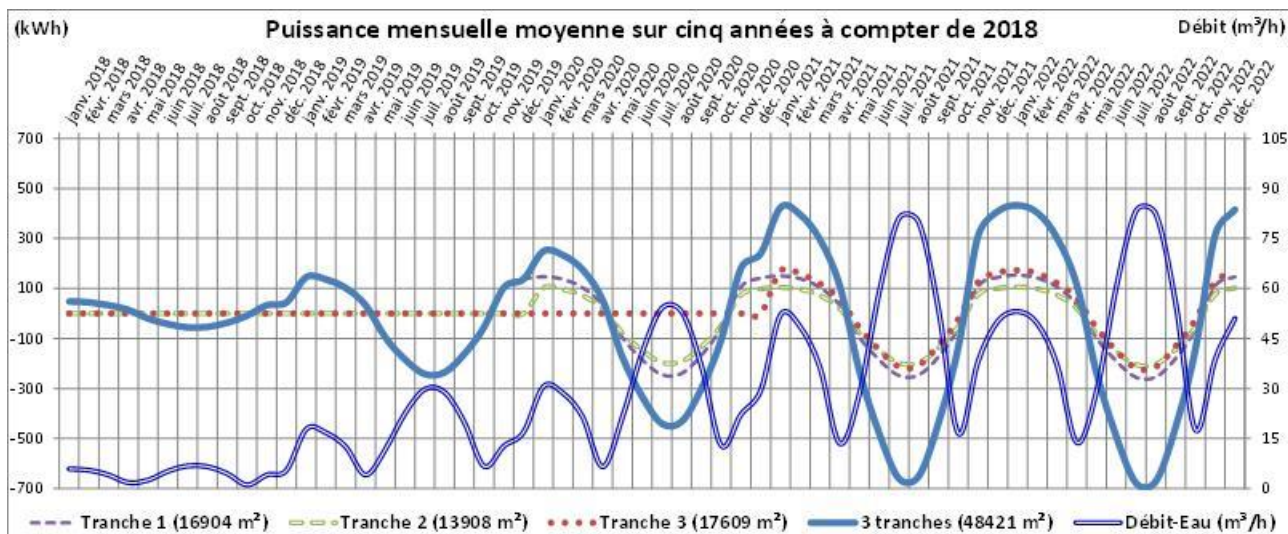


Figure 45 : Résultats pour le système de référence en raccordant l'ensemble de la ZA Morandat

Si on considère qu'une température de l'eau du Puits Y ne peut être raisonnablement employée au-delà de 35 °C à 40 °C pour des applications de climatisation (la chaleur évacuée des groupes froid devrait alors être significativement supérieure à 40 °C), alors l'examen des résultats des estimations indique que la saturation thermique serait constatée dès la saison estivale 2021 (Figure 46).

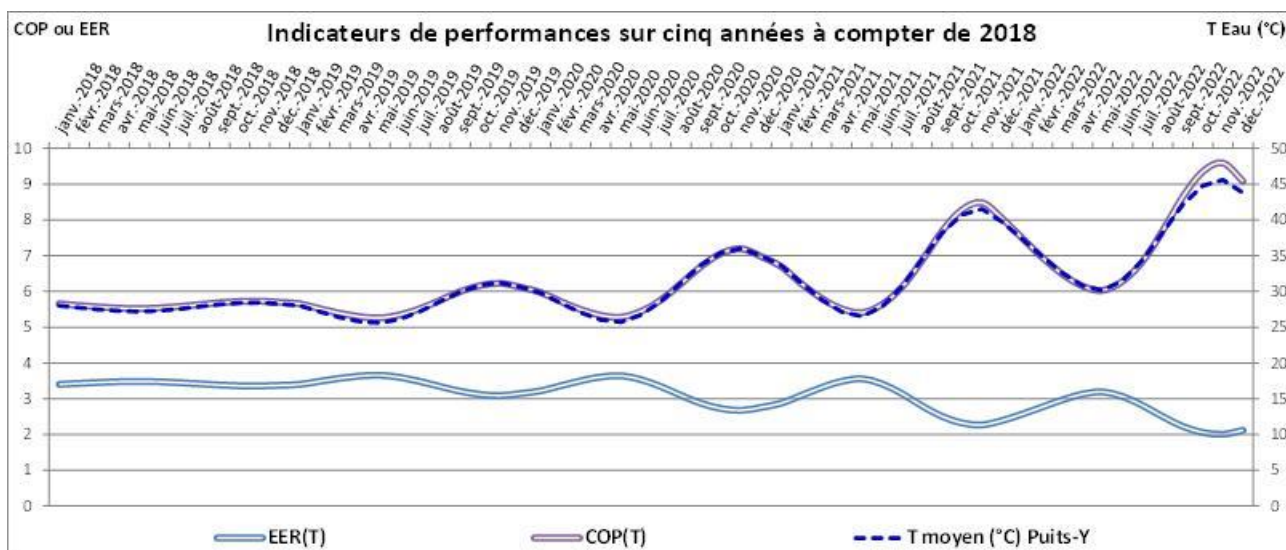


Figure 46 : Indicateurs de performance pour le système de référence non optimisé

De plus, pour ces raccordements, l'analyse montre que la dégradation tendrait à s'amplifier au point de rapidement rendre impossible l'utilisation du Puits Y pour les usages de climatisation (Figure 46).

Il est donc impératif d'identifier les moyens permettant de parvenir à un rééquilibrage et, pour cela, de se faire une idée de la sensibilité du système à surface raccordée constante. C'est l'objet du chapitre suivant.

Analyse de la sensibilité de l'équilibrage thermique Hiver / Eté obtenu par la diminution de la demande en climatisation

En restant sur la base des 48 000 m² pour l'aménagement de la ZA Morandat, il a ci-dessus été constaté que la demande en rafraîchissement paraît proportionnellement trop élevée vis-à-vis de la demande en chauffage.

De même, on considère ici que les échanges thermiques avec le Puits Y pour le chauffage et l'ECS restent similaires à ceux constatés dans le Tableau 4, à savoir de l'ordre de 1 GWh/an.

Les analyses de sensibilité ci-dessous portent donc sur les approches permettant d'abaisser vers 1 GWh les injections de chaleur dans le Puits Y en période estivale.

Plus précisément, il est considéré que, pour parvenir à un fonctionnement équilibré du Puits Y, il faudrait diminuer de l'ordre de 0,3 GWh/an les demandes pour la climatisation à l'échelle des 48 000 m² de l'hypothèse de référence.

Les deux approches pour parvenir à un tel rééquilibrage sont alors :

- **Restreindre les surfaces raccordées pour de la climatisation géothermique**
- **Améliorer la performance annuelle de tous les locaux climatisés**

Hypothèse d'une diminution des surfaces raccordées pour la climatisation

Nota : Définir les moyens alternatifs à la géothermie dans le Puits Y pour produire de l'eau glacée ne relève pas des objectifs de la présente étude mais on peut néanmoins considérer que la solution la plus probable repose sur des groupes frigorifiques échangeant avec l'air ambiant.

En supposant que les bâtiments rénovés ne sont pas raccordés pour de la climatisation ni du rafraîchissement, le présent paragraphe se propose d'illustrer la part de rafraîchissement qu'il conviendrait de produire par d'autres moyens que les échanges avec le Puits Y :

- soit avec des moyens combinés en un système hybride permettant de produire l'eau glacée avec la source thermodynamiquement la plus favorable entre la source géothermique (Puits Y) ou avec la source atmosphérique. Ces moyens supplémentaires peuvent être centralisés pour abaisser la température de départ réseau ou répartis au niveau des sous-stations,
- soit avec des moyens totalement indépendants qui n'ont pas accès à la ressource du Puits Y et ne sont donc pas raccordés au réseau en boucle tempérée.

Ce cas de figure propose donc de considérer que seuls les futurs bâtiments neufs seront raccordés pour de la climatisation au réseau d'énergie en boucle tempérée alors que tous les locaux de la ZA Morandat le seront pour le chauffage et pour l'ECS.

Ci-dessous, le Tableau 5 synthétise les performances annuelles correspondant alors à ce cas de figure, tandis que le Tableau 6 récapitule les demandes annuelles en énergie utile. Vis-à-vis des demandes de références, les changements sont surlignés en jaune.

	Demandes thermiques utiles du bâti retenues pour l'étude			
	Chauffage kWh/m ² .an	ECS kWh/m ² .an	Frais direct kWh/m ² .an	Froid kWh/m ² .an
Tertiaire rénové	40	5	0	0
Entreposage	40	0	0	0
Centre-Multi-Culturel	40	5	0	0
Hôtellerie	20	20	0	25
Tertiaire-Rafrachi	20	5	10	0
Tertiaire neuf	20	5	0	25
Hôtel Entreprises	40	5	0	0

Tableau 5 : Demandes annuelles spécifiques pour le cas où les bâtiments rénovés ne sont pas raccordés pour du rafraîchissement ou de la climatisation

	Surfaces m ²	Chauffage MWh/an	ECS MWh/an	Frais direct MWh/an	Froid MWh/an
Tertiaire rénové	1 060	42	5	0	0
Entreposage	640	26	0	0	0
Centre-Multi-Culturel	4 440	178	22	0	0
Hôtellerie	3 500	70	70	0	88
Tertiaire-Rafrachi	0	0	0	0	0
Tertiaire neuf	36 981	740	185	0	925
Hôtel Entreprises	1 800	72	9	0	0
Totaux	48 421	1 127	291	0	1 012

Tableau 6 : Demandes annuelles cumulées en énergie utile pour le cas où les bâtiments rénovés ne sont pas raccordés pour du rafraîchissement ou de la climatisation

Comme le montre le Tableau 7 ci-dessous, le fait de ne pas raccorder les locaux rénovés pour le rafraîchissement irait dans le sens du rééquilibrage entre puisages et réinjections mais resterait insuffisant, surtout que la baisse du niveau de la température dans le Puits Y conduit à un COP des pompes à chaleur moins favorable (Figure 47).

	Système de référence 48 000 m²		Cas du non-raccordement de la climatisation des bâtiments rénovés	
	Hiver (MWh/an)	Été (MWh/an)	Hiver (MWh/an)	Été (MWh/an)
Année N	108.4	-108.0	126.5	0.0
Année N+1	326.6	-482.8	326.7	-355.6
Année N+2	560.4	-884.6	552.7	-741.7
Année N+3	964.4	-1 287.6	940.6	-1 072.4
Année N+4	982.3	-1 328.1	949.5	-1 083.8

Tableau 7 : Comparaison des demandes géothermiques du système de référence et du cas où les bâtiments rénovés ne sont pas raccordés pour le rafraîchissement

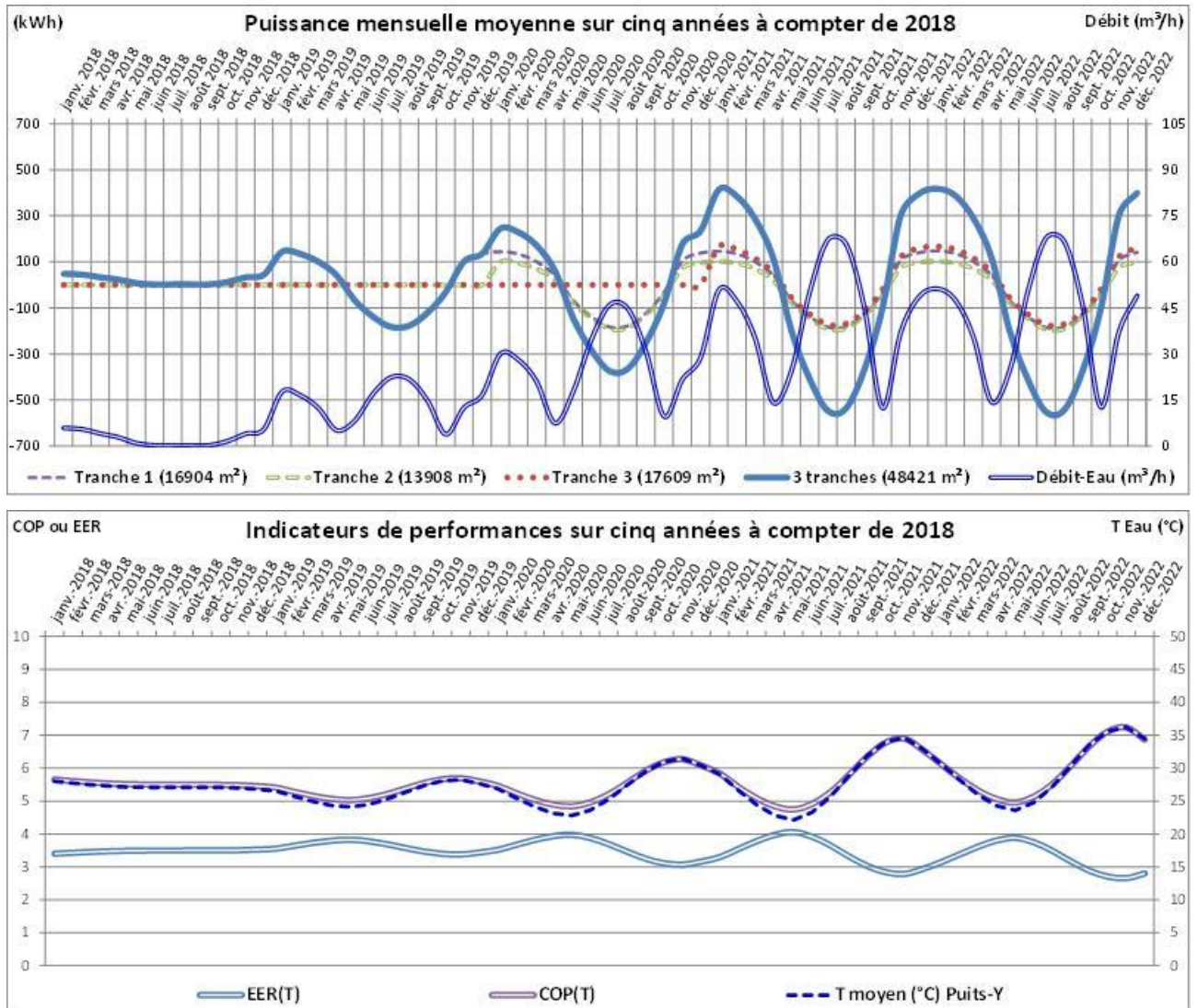


Figure 47 : Performances thermiques atteintes sur la ZA Morandat en ne raccordant pas pour de la climatisation les bâtiments rénovés

Constat : Vis-à-vis du système de référence, le fait de ne pas raccorder pour de la climatisation les bâtiments rénovés ou à rénover ne permet de réduire que de moitié le déséquilibre thermique entre injections estivales et puisages hivernaux. Aussi, la température de l'eau dans le Puits Y tendrait toujours à augmenter inexorablement au point de ne plus permettre de façon efficiente l'exploitation estivale pour de la climatisation ; le rafraîchissement direct restant en toutes périodes impossible du fait d'un niveau de la température de l'eau descendant guère sous 25 °C.

Cette solution n'est donc pas suffisante car les surfaces concernées sont insuffisantes. De fait, cette approche reste pertinente à condition de doubler les surfaces ; ce qui impliquerait donc de l'appliquer à des constructions neuves.

Dans cet esprit, l'objet du paragraphe suivant est donc d'illustrer ce que pourrait produire un travail d'amélioration de la performance des bâtiments neufs ; cette étude de sensibilité permettant d'estimer assez précisément l'objectif à atteindre en termes de réduction de demandes en énergie finale de climatisation.

Hypothèse de l'amélioration de la performance annuelle des locaux neufs

En restant sur la surface de référence de 48 000 m², il est ici fait l'hypothèse de travail que, pour parvenir à l'équilibre Hiver / Été, les demandes annuelles en climatisation des bâtiments neufs doivent faire l'objet d'une amélioration de la performance.

Vis-à-vis de la performance de référence, il est constaté qu'une amélioration de l'ordre de 20% conduirait pratiquement à l'équilibre recherché.

Demandes thermiques utiles du bâti retenues pour l'étude				
	Chauffage kWh/m ² .an	ECS kWh/m ² .an	Frais direct kWh/m ² .an	Froid kWh/m ² .an
Tertiaire rénové	40	5	0	50
Entreposage	40	0	0	0
Centre-Multi-Culturel	40	5	10	0
Hôtellerie	20	20	0	19
Tertiaire-Rafrica	20	5	10	0
Tertiaire neuf	20	5	0	19
Hôtel Entreprises	40	5	0	25

Tableau 8 : Demandes annuelles spécifiques pour le cas où la performance en climatisation des bâtiment neuf est améliorée de l'ordre de 20%

	Surfaces m ²	Chauffage MWh/an	ECS MWh/an	Frais direct MWh/an	Froid MWh/an
Tertiaire rénové	1 060	42	5	0	53
Entreposage	640	26	0	0	0
Centre-Multi-Culturel	4 440	178	22	44	0
Hôtellerie	3 500	70	70	0	67
Tertiaire-Rafrica	0	0	0	0	0
Tertiaire neuf	36 981	740	185	0	703
Hôtel Entreprises	1 800	72	9	0	45
Totaux	48 421	1 127	291	44	867

Tableau 9 : Demandes annuelles cumulées en énergie utile pour le cas où la performance en climatisation des bâtiment neuf est améliorée de l'ordre de 20%

	Système de référence 48 000 m ²		Amélioration de la performance en climatisation de 20% pour le neuf	
	Hiver (MWh/an)	Été (MWh/an)	Hiver (MWh/an)	Été (MWh/an)
Année N	108.4	-108.0	108.4	-108.0
Année N+1	326.6	-482.8	329.4	-381.1
Année N+2	560.4	-884.6	560.8	-666.0
Année N+3	964.4	-1 287.6	948.4	-936.6
Année N+4	982.3	-1 328.1	947.6	-935.8

Tableau 10 : Comparaison des demandes géothermiques du système de référence et du cas où la performance en climatisation des bâtiments neufs est améliorée de l'ordre de 20%

Pour cette hypothèse de travail constant à examiner la sensibilité du système à l'amélioration de la performance des bâtiments neufs au regard des besoins en climatisation, on constate qu'une amélioration de l'ordre de 20% permettrait de maintenir durablement la température de

l'eau dans le Puits Y sous 35 °C en fin de saison estivale et au-dessus de 20 °C en fin de saison hivernale ; le ΔT saisonnier à compter de la fin du programme de construction s'établissant vers 10 °C à 12°C.

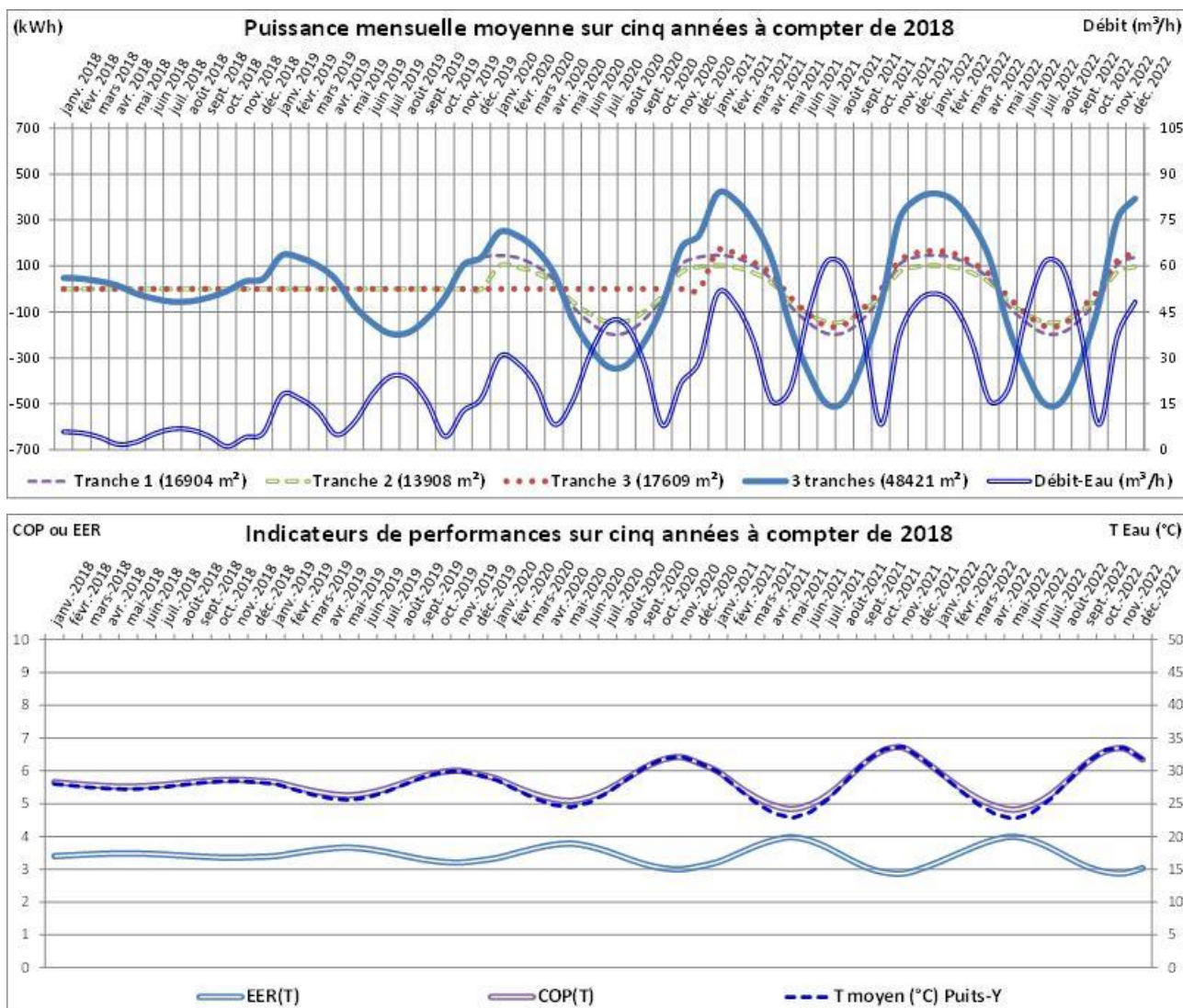


Figure 48 : Performances thermiques atteintes sur la ZA Morandat en diminuant la demande en climatisation de tous les locaux

Constat : En abaissant de 1 110 MWh/an à 870 MWh/an la demande en énergie finale de climatisation, cela sans modifier la demande des autres énergies thermiques, il est constaté que le système énergétique exploitant le Puits Y devient durablement équilibré à hauteur de 940 à 950 MWh échangés chaque saison.

Il est rappelé que si le ΔT d'une dizaine de degrés resterait du même ordre quel que soit le début de la mise en exploitation, il pourrait en être tout autrement pour le niveau des températures dans le Puits Y car si l'exploitation commence par une période de chauffage, alors la température dans le Puits Y serait toujours significativement plus basse que si l'exploitation débute par une période de climatisation.

5.3.2. Investigations pour une surface de l'ordre de 65 000 m²

Présentation

En premier lieu, il est rappelé qu'en première approche à l'échelle d'un semestre, on peut considérer qu'un ΔT 15 °C de l'eau du Puits Y représente une énergie échangée de l'ordre de 1,3 GWh par saison en tenant compte de l'énergie des roches encaissantes. Il est également important de préciser que ce ΔT de 15 °C doit être considéré comme une valeur réaliste même s'il est techniquement tout à fait possible d'envisager de le porter à 25 °C ou même plus. Toutefois, dans un tel cas de figure, les performances des machineries thermodynamiques pourraient être dégradées, plus particulièrement pour la climatisation puisque la tendance naturelle du Puits Y est moins dans le sens des températures basses que dans celui des températures plus élevées.

Les analyses de sensibilité opérées précédemment ont porté sur le raccordement de 48 000 m², dont 8 000 m² rénovés, ce qui, du seul point de vue des puisages pour le chauffage et l'ECS, induisait un échange saisonnier d'énergie inférieur à la valeur de 1,3 GWh rappelée ci-dessus. Pour cette raison, il paraît réaliste d'examiner la sensibilité du système au regard d'une augmentation des surfaces raccordées à l'échelle de la ZA Morandat, étant entendu que cette augmentation des surfaces doit majoritairement se traduire par une augmentation de la demande en chaleur et non pas en climatisation.

Dans ce but, le présent chapitre examine les conditions à respecter pour que soient raccordées toutes les surfaces envisagées sur la ZA Morandat par le Cabinet Malot et Associés en janvier 2014 ; à savoir 57 512 m² de constructions nouvelles :

- Les tranches 1 et 2 conduisent alors à des constructions sur 3 niveaux portant la surface cumulées de ces deux tranches à 40 968 m² au lieu de 27 312 m² précédemment.
- La Tranche 3 conduit à des constructions avec un 3^{ème} niveau partiel portant la surface à 16 544 m² au lieu de 13 169 m² précédemment.

Toutefois, comme exprimé ci-dessus, il reste impératif de préserver l'équilibrage thermique entre puisage hivernal de chaleur et injection estivale de chaleur. Pour cette raison, il est fait l'hypothèse que les surfaces supplémentaires recourent à du rafraîchissement direct et non pas à de la climatisation. La viabilité de cette hypothèse est donc conditionnée par l'obtention d'un niveau de la température suffisamment bas, typiquement moins de 25 °C en Juillet et Août.

Dans un premier temps, on utilise les mêmes demandes spécifiques que pour le cas de référence (Tableau 2) tel que rappelé par le Tableau 11. Dans un second temps un ajustement sera discuté pour étudier s'il est possible de parvenir à l'équilibre.

	Chauffage kWh/m ² .an	ECS kWh/m ² .an	Frais direct kWh/m ² .an	Froid kWh/m ² .an
Tertiaire rénové	40	5	0	50
Entreposage	40	0	0	0
Centre-Multi-Culturel	40	5	10	0
Hôtellerie	20	20	0	25
Tertiaire-Rafraichi	20	5	10	0
Tertiaire neuf	20	5	0	25
Hôtel Entreprises	40	5	0	25

Tableau 11 : Demandes annuelles spécifiques en énergies utiles – Hypothèses de référence

VILLE DE GARDANNE

PUITS YVON MORANDAT

SEMAG

MAITRE D'OUVRAGE

ESTIMATION DES SURFACES DE PLANCHER A REALISER

ESTIMATION ETABLIE SELON PLAN DE MASSE PA9, ET HORS BATIMENTS EXISTANTS)

SECTEUR	BATIMENT	LINEAIRE	LARGEUR	Hypothèse 1 : 1 niveau		Hypothèse 2 : 2 niveaux		Hypothèse 3 : 2.5 niveaux		Hypothèse 4 : 3 niveaux		
				Nb de niv	Surface	Nb de niv	Surface	Nb de niv	Surface	Nb de niv	Surface	
EST	R+3 MAXI 13 m à l'égout	Tranche 1 (2 niveaux)										
		1a	52	16	1	832	2	1664	2.5	2080	3	2496
		1b	40	22	1	880	2	1760	2.5	2200	3	2640
		2	40	22	1	880	2	1760	2.5	2200	3	2640
		3	30	16	1	480	2	960	2.5	1200	3	1440
		4	70	35	1	2450	2	4900	2.5	6125	3	7350
		5	40	16	1	640	2	1280	2.5	1600	3	1920
		6	30	18	1	540	2	1080	2.5	1350	3	1620
		7	60	28	1	1680	2	3360	2.5	4200	3	5040
		8	65	16	1	1040	2	2080	2.5	2600	3	3120
		9	75	14	1	1050	2	2100	2.5	2625	3	3150
		10	45	16	1	720	2	1440	2.5	1800	3	2160
		11	58	16	1	928	2	1856	2.5	2320	3	2784
		12	24	16	1	384	2	768	2.5	960	3	1152
13	40	16	1	640	2	1280	2.5	1600	3	1920		
14	32	16	1	512	2	1024	2.5	1280	3	1536		
TOTAL SECTEUR EST					13656		27312		34140		40968	
Tranche 2 (2 niveaux)												
Tranche 3 (2 niveaux)												
Hypothèse de base : 1 niveau												
OUEST	HAUTEURS PL : R+1 en amont et 7 m R+3 en aval et 15 m et 3ème niveau partiel sur un linéaire maxi de 25m RDC : dégagé et occupé à 20%	15	62	15	2.2	2046	Tranche 3 (2 niveaux)			Hypothèse 3e niveau partiel	avec 3ème niveau partiel	2421
		16	HOTEL		3500						3500	
		17	30	15	2.2	990					avec 3ème niveau partiel	1365
		18	28	15	2.2	924					avec 3ème niveau partiel	1299
		19	35	15	2.2	1155					avec 3ème niveau partiel	1530
		20	29	15	2.2	957					avec 3ème niveau partiel	1332
		21	29	15	2.2	957					avec 3ème niveau partiel	1332
		22	27	15	2.2	891					avec 3ème niveau partiel	1266
		23	28	15	2.2	924					avec 3ème niveau partiel	1299
		24	25	15	2.2	825					avec 3ème niveau partiel	1200
TOTAL SECTEUR OUEST					13169						16544	
Cumul												
Hypothèse 1 Secteur Est + Secteur Ouest base					26825	Hypothèse 2 Secteur Est 2niv. + Secteur Ouest base					4730	
Hypothèse 3 Secteur Est + Secteur Ouest 3 niv.						Hypothèse 3 Secteur Est + Secteur Ouest 3 niv.					57512	
TOTAL SECTEURS OUEST ET EST						TOTAL SECTEURS OUEST ET EST						

Figure 49 : Tableau des surfaces à construire sur la ZA Morandat – hypothèse maximale

Hypothèse de l'augmentation des surfaces raccordées à du rafraîchissement direct

Avec les hypothèses ci-dessus (Tableau 11), les demandes annuelles en énergie utile pour l'ensemble des surfaces envisagées sur la ZA Morandat sont indiquées dans le Tableau 12 ci-dessous, qui s'applique à 65 452 m² au total.

Vis-à-vis du cas de référence, les surfaces supplémentaires (17 031 m²) sont considérées comme n'ayant pas de climatisation mais du rafraîchissement direct.

	Surfaces m ²	Chauffage MWh/an	ECS MWh/an	Frais direct MWh/an	Froid MWh/an
Tertiaire rénové	1 060	42	5	0	53
Entreposage	640	26	0	0	0
Centre-Multi-Culturel	4 440	178	22	44	0
Hôtellerie	3 500	70	70	0	88
Tertiaire-Rafrachi	17 031	341	85	170	0
Tertiaire neuf	36 981	740	185	0	925
Hôtel Entreprises	1 800	72	9	0	45
Totaux	65 452	1 468	377	215	1 110

Tableau 12 : Demandes annuelles cumulées en énergie utile pour le cas d'une surface portée à près de 65 500 m² par l'ajout de locaux en rafraîchissement direct

	Système de référence 48 000 m ²		Ajout de locaux en rafraîchissement direct pour atteindre 65 500 m ²	
	Hiver (MWh/an)	Été (MWh/an)	Hiver (MWh/an)	Été (MWh/an)
Année N	108.4	-108.0	108.4	-108.0
Année N+1	326.6	-482.8	442.1	-526.1
Année N+2	560.4	-884.6	793.2	-963.5
Année N+3	964.4	-1 287.6	1 244.5	-1 363.4
Année N+4	982.3	-1 328.1	1 254.5	-1 374.7

Tableau 13 : Comparaison des demandes géothermiques du système de référence et du cas où les surfaces sont portées à 65 500 m² par ajout de locaux en rafraîchissement direct.

Avec les demandes explicitées par le Tableau 12 ci-dessus, les quantités échangées en saison hivernale et en saison estivale ne sont pas tout à fait équilibrées (Tableau 13) et conduisent à une augmentation progressive mais inexorable de la température de l'eau dans le Puits Y (Figure 50). Cette situation rend inopérante l'option du rafraîchissement direct (Figure 50) ; étant rappelé que la température de l'eau doit rester significativement inférieure à 25 °C en Juillet et en Août.

Or, la température ne descend pratiquement pas sous 25 °C ; ce qui tendrait à montrer que si léger déséquilibre thermique il doit y avoir, alors mieux vaut que cela soit dans le sens d'un excédent de puisage hivernal.

Dans ce but, le paragraphe suivant discute l'amélioration des performances thermiques des autres locaux neufs qui seraient nécessaires.

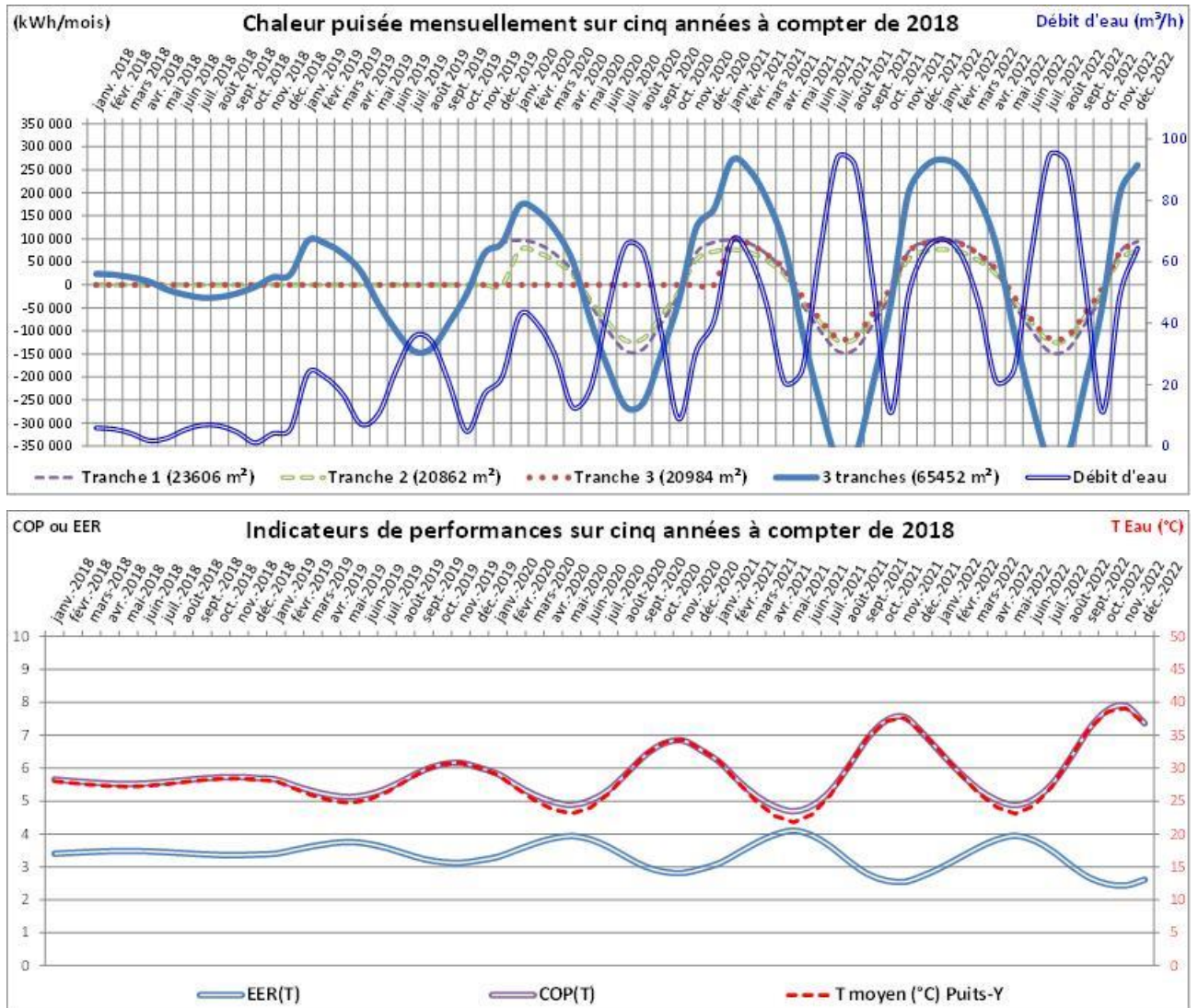


Figure 50 : Caractéristiques du fonctionnement pour les surfaces portées à 65 500 m² par l'ajout de locaux en rafraîchissement direct

Hypothèse de l'amélioration complémentaire des performances en climatisation pour les autres locaux neufs

Le paragraphe qui précède indique que le raccordement de l'ensemble des 65 500 m² envisagés à l'échelle de la ZA Morandat conduit à une demande hivernale restant sous l'indicateur de 1,3 GWh, du moins lorsque le système recourt à des pompes à chaleur.

Il n'en est pas de même pour les injections estivales de chaleur que se situent au-dessus de cet indicateur considéré comme représentatif des aptitudes du Puits Y.

Le présent paragraphe a pour objet d'estimer de combien il faut d'abaisser les demandes en climatisation pour parvenir à une injection de chaleur estivale équilibrée vis-à-vis des puisages hivernaux étant entendu que le fait d'abaisser la température dans le Puits Y conduit, mécaniquement, à réduire également le puisage hivernal du fait de l'abaissement du COP des machineries thermodynamiques.

En première approche, il ressort qu'abaisser les demandes spécifiques en climatisation de l'ordre de 10% pour les locaux neufs n'étant pas raccordés à du rafraîchissement direct

permettrait d'atteindre l'objectif. Les demandes sont alors comme indiqué dans le Tableau 14 et le Tableau 15 ci-dessous où sont surlignées les valeurs qui diffèrent du cas de référence.

	Chauffage kWh/m ² .an	ECS kWh/m ² .an	Frais direct kWh/m ² .an	Froid kWh/m ² .an
Tertiaire rénové	40	5	0	50
Entreposage	40	0	0	0
Centre-Multi-Culturel	40	5	10	0
Hôtellerie	20	20	0	22.5
Tertiaire-Rafrachi	20	5	10	0
Tertiaire neuf	20	5	0	22.5
Hôtel Entreprises	40	5	0	25

Tableau 14 : Demandes annuelles spécifiques en énergies utiles pour le cas de 65 500 m² optimisant le rafraichissement direct et la climatisation

	Surfaces m ²	Chauffage MWh/an	ECS MWh/an	Frais direct MWh/an	Froid MWh/an
Tertiaire rénové	1 060	42	5	0	53
Entreposage	640	26	0	0	0
Centre-Multi-Culturel	4 440	178	22	44	0
Hôtellerie	3 500	70	70	0	79
Tertiaire-Rafrachi	17 031	341	85	170	0
Tertiaire neuf	36 981	740	185	0	832
Hôtel Entreprises	1 800	72	9	0	45
Totaux	65 452	1 468	377	215	1 009

Tableau 15 : Demandes annuelles cumulées, exprimées en énergie utiles pour le cas de 65 500 m² optimisant le rafraichissement direct et la climatisation

Avec les demandes ci-dessus, les estimations montrent que l'équilibre hiver/été est atteint et que les échanges thermiques restent sous l'indicateur de 1,3 GWh par saison.

	Système de référence 48 000 m²		Optimisation mixant rafraichissement direct et climatisation - 65 500 m²	
	Hiver (MWh/an)	Eté (MWh/an)	Hiver (MWh/an)	Eté (MWh/an)
Année N	108.4	-108.0	108.4	-108.0
Année N+1	326.6	-482.8	443.1	-483.8
Année N+2	560.4	-884.6	792.1	-873.5
Année N+3	964.4	-1 287.6	1 233.7	-1 221.2
Année N+4	982.3	-1 328.1	1 232.5	-1 220.3

Tableau 16 : Comparaison des demandes géothermiques du système de référence et du cas de 65 500 m² optimisant le rafraichissement direct et la climatisation

Par contre, comme le montrent les graphiques ci-dessous (Figure 51), la température dans le Puits Y paraît trop élevée en août pour pouvoir garantir en toutes circonstances le fonctionnement en rafraichissement direct.

Pour-autant, l'option du rafraichissement direct n'est pas à rejeter. Elle est discutée au paragraphe suivant.

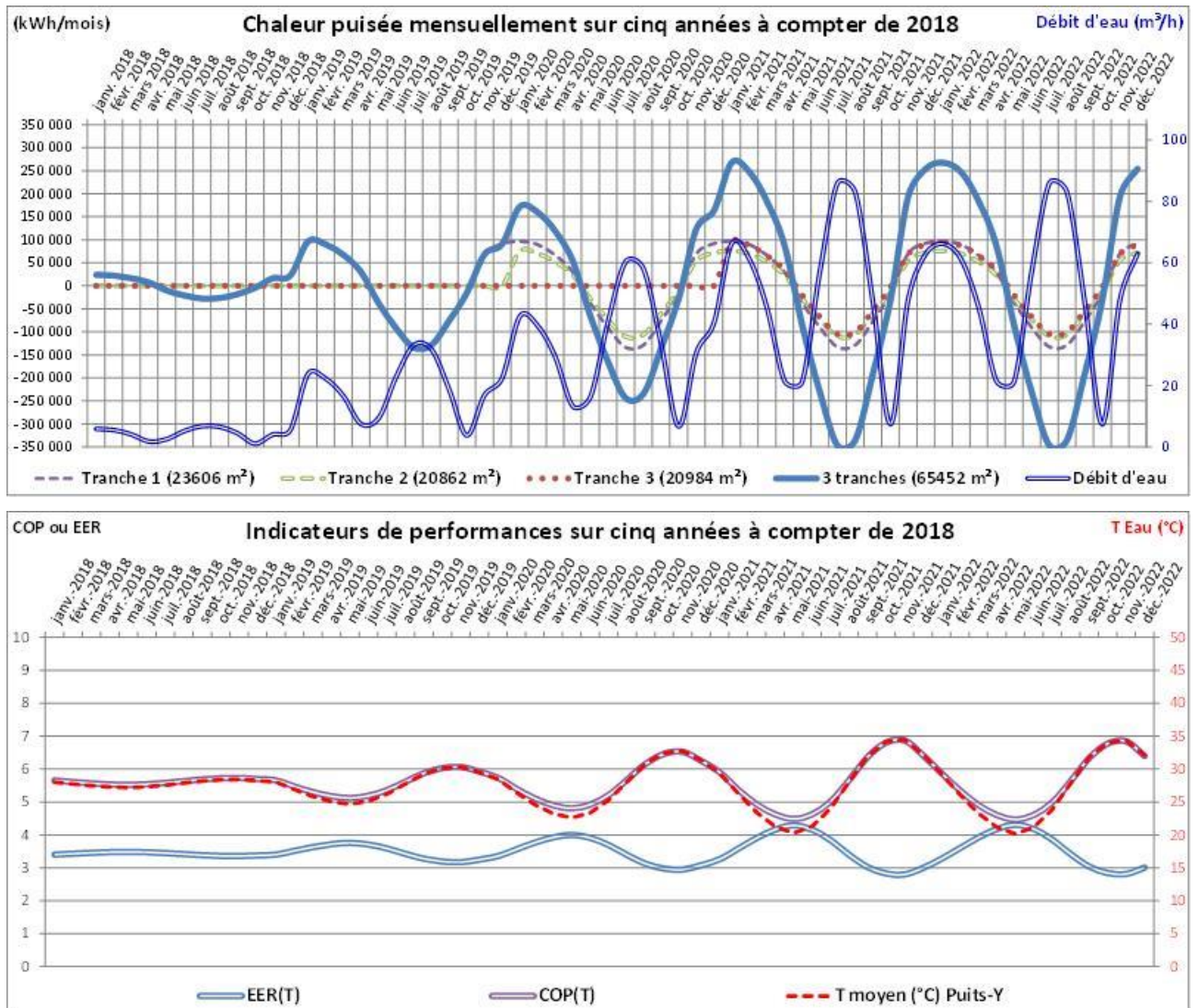


Figure 51 : Caractéristiques du fonctionnement pour le cas d'une surface totale de 65 500 m² optimisant le rafraîchissement direct et la climatisation

Contribution de la performance des surfaces rénovées

Une autre interrogation porte sur l'opportunité de raccorder ou non les bâtiments rénovés. Pour analyser cette question, les demandes du paragraphe précédent sont reprises mais sans les 8 000 m² de surfaces rénovées.

Les demandes en énergie utile ressortent alors comme récapitulé par le Tableau 17 ci-dessous :

	Surfaces m ²	Chauffage MWh/an	ECS MWh/an	Frais direct MWh/an	Froid MWh/an
Tertiaire rénové	0	0	0	0	0
Entreposage	0	0	0	0	0
Centre-Multi-Culturel	0	0	0	0	0
Hôtellerie	3 500	70	70	0	79
Tertiaire-Rafrachi	17 031	341	85	170	0
Tertiaire neuf	36 981	740	185	0	832
Hôtel Entreprises	0	0	0	0	0
Totaux	57 512	1 150	340	170	911

Tableau 17 : Demandes annuelles cumulées, exprimées en énergie utiles pour le cas de 57 500 m² de bâtiments neufs mixant rafraîchissement direct et climatisation

Vis-à-vis du cas précédent appliquant des demandes énergétiques identiques à l'ensemble des 65 500 m² de la ZA Morandat, le système énergétique devient déséquilibré du point de vue des échanges avec le Puits Y dès lors que sont soustraites les surfaces rénovées.

	Système de référence 48 000 m ²		Climatisation et rafraîchissement direct - 57 500 m ² - Bâtiments neufs	
	Hiver (MWh/an)	Eté (MWh/an)	Hiver (MWh/an)	Eté (MWh/an)
Année N	108.4	-108.0	0.0	0.0
Année N+1	326.6	-482.8	334.9	-377.0
Année N+2	560.4	-884.6	684.0	-767.3
Année N+3	964.4	-1 287.6	984.6	-1 096.8
Année N+4	982.3	-1 328.1	992.4	-1 105.2

Tableau 18 : Comparaison des demandes géothermiques du système de référence et du cas portant sur 57 500 m² de bâtiments neufs

L'essentiel de l'explication de ce déséquilibre (Figure 52) provient du Centre Culture Scientifique Technique et industriel (CCSTI), ci-dessus dénommé par simplification Centre-Multi-Culturel, et pour lequel cette partie de l'étude considère qu'il n'est raccordé qu'à du rafraîchissement direct.

Par cet exemple, il est démontré l'extrême sensibilité du système thermique vis-à-vis de la performance thermique d'un seul bâtiment, en l'occurrence le Centre-Multi-Culturel, pour lequel on a supposé à dessein qu'il pourrait faire appel au rafraîchissement direct.

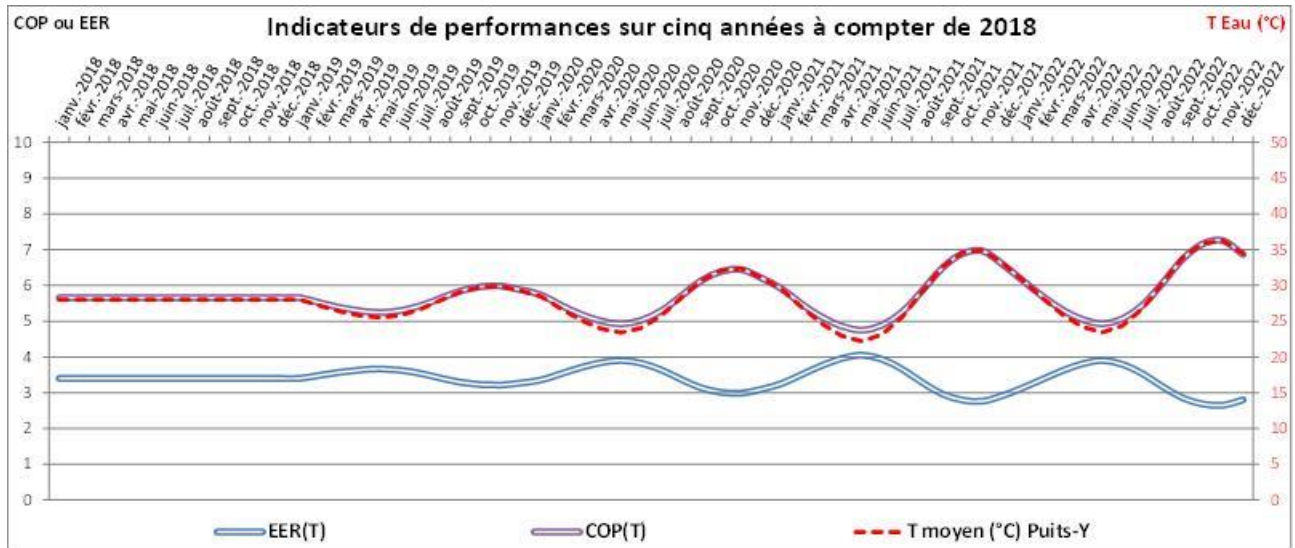


Figure 52 : Illustration du déséquilibre apparaissant lorsque le Centre Multi-Culturel n'est plus raccordé

5.3.3. Discussion

L'analyse des hypothèses ci-dessus portant sur la surface maximale de locaux envisagés sur la ZA Morandat tendrait à montrer qu'un équilibre pourrait être atteint à condition d'introduire une part de rafraîchissement direct dans la gestion du confort thermique des locaux neufs ou bien – ce qui peut revenir au même – à améliorer la performance estivale des locaux.

Sur le principe, le rafraîchissement direct serait à recommander en début de saison estivale alors que la température de l'eau dans le Puits Y est la plus basse. L'amélioration de la performance des locaux est, par contre, effective toute la saison estivale.

La condition à remplir pour que le rafraîchissement direct puisse être utilisé est que les émetteurs dans les locaux soient compatibles, par exemple :

- Planchers chauffants rafraîchissants
- Plafonds rafraîchissants ou poutres ou parois rafraîchissantes
- Ventilo-convecteurs

En définitive, avec les hypothèses examinées ci-dessus, il est surtout montré que le système thermique constitué autour du Puits Y est particulièrement sensible aux performances des locaux qui lui sont raccordés.

Par voie de conséquence, s'il n'est pas possible de garantir la performance de tel ou tel bâtiment, alors il est recommandé de doter le réseau en boucle tempérée de moyens alternatifs au Puits Y pour assurer le rafraîchissement des locaux.

Constat : Dans cette hypothèse, une des possibilités consisterait à rafraîchir le départ réseau en saison estivale, par exemple à l'aide d'un groupe fonctionnant en aérothermie, éventuellement assistée de stockages tampon. En cela, il s'agit d'une solution comparable à celle employée pour le Fort d'Issy (Figure 25) mais appliquée au rafraîchissement et non à l'appoint thermique pour le chauffage.

La solution ci-dessus peut n'être que partielle et n'intéresser que les branches du réseau ne tirant pas vraiment parti des montages en thermofrigopompes pour la production d'eau-chaude sanitaire (ECS).

5.3.4. Conclusions intermédiaires et recommandations pour la suite

Ce chapitre a examiné un système bâti sur l'hypothèse qu'aucun aménagement particulier n'est opéré dans le Puits Y hormis la mise en place d'équipements géothermiques de type sonde géothermique coaxiale ou dispositif de pompage / réinjection de type PACP.

Du point de vue de l'exploitation, ce chapitre a considéré que la distribution se fait en réseau en boucle tempérée et machineries thermodynamiques de type Thermo-Frigo-Pompe réparties au niveau de toutes les sous-stations, ce système étant apte à satisfaire le critère d'une compensation équilibrée entre les énergies puisées en Hiver et réinjectées en Eté dans le Puits Y. Le Puits Y représente alors un stockage inter-saisonnier d'énergie thermique.

Avec les demandes énergétiques proposées par le bureau d'étude BG, les bilans saisonniers seraient fortement déséquilibrés, même à l'échelle de seulement 48 000 m² de la ZA Morandat, car les rejets thermiques issues des climatisations excèdent d'approximativement 30% les puisages thermiques pour le chauffage et l'ECS ; cela même si une partie de l'ECS est directement produite *in situ* par chaque machinerie de type Thermo-Frigo-Pompe sans que rien ne transite par le Puits Y ni ne circule dans le réseau en boucle tempérée.

Considérant que les puisages thermiques annuels pour le chauffage et l'ECS sont de l'ordre de 900 MWh à 1 000 MWh à l'échelle de 48 000 m² de la ZA Morandat, le présent chapitre a examiné plusieurs hypothèses de travail pour que les puisages et les rejets se compensent.

- La première hypothèse consiste à raccorder 20 000 m² supplémentaire de logements qui privilégient les puisages en saison hivernale, donc hors ZA Morandat, pour lesquels le confort thermique estival est apporté par du rafraîchissement direct à hauteur de seulement 5 kWh/m².an et les demandes pour le chauffage et l'ECS respectivement de 15 et 25 kWh/m².an.

Pour cette première hypothèse, les capacités thermiques du Puits Y sont alors exploitées au maximum avec un ΔT de l'ordre de 15 °C alors que les puisages et rejets s'équilibrent à hauteur de 1 300 MWh par saison.

- La seconde hypothèse consiste à diminuer les rejets en période estivale, donc à abaisser les besoins en climatisation :
 - Une première solution examinée consiste à ne pas raccorder la climatisation des locaux anciens ni de l'hôtellerie
 - Une seconde solution examinée consiste à améliorer de 15% la performance annuelle en climatisation

Pour cette seconde hypothèse, les capacités thermiques du Puits Y ne sont que partiellement exploitées à l'échelle de 48 000 m² SHON avec un ΔT de l'ordre de 10 °C alors que les puisages et rejets s'équilibrent à hauteur de 900 à 925 MWh par saison.

En conclusion, en combinant les observations ci-dessus résultant des premières investigations, il est apparu envisageable de gérer avec le Puits Y l'ensemble des surfaces de la ZA Morandat (65 000 m²) à la condition d'améliorer significativement la performance du mode climatisation ou de prévoir un appoint pour une fraction de la demande en climatisation.

5.4. EXAMEN DES CONFIGURATIONS B) ET C) POUR LE PUITS Y

Le but de ces deux aménagements est de constituer deux stocks pouvant avoir des températures différentes, cela afin d'accroître les aptitudes thermiques du stockage.

- **Aménagement d'un obturateur semi-étanche (mobile pour la configuration C)**
- **Ennoiement restant sur environ 800 m piloté par le pompage au Puits Gérard**
- **Distribution en réseau "3 ou 4 tubes" de type "boucle tempérée"**
- **Pour la configuration B)**
 - ΔT dans chacun des deux stocks d'environ 15 °C
 - ΔT entre départ et retour jusqu'à 25 °C
 - Départ 33-35 °C en début de saison hivernale - Retour 10-12 °C en fin de saison
 - Départ 10-12 °C en début de saison estivale - Retour 33-35 °C en fin de saison
 - Echanges thermiques Hiver / Eté équilibrés jusqu'à 1,3 GWh
- **Pour la configuration C)**
 - ΔT entre départ et retour jusqu'à 25 °C
 - Départ 33-35 °C en début de saison hivernale - Retour 10-12 °C en fin de saison
 - Départ 10-12 °C en début de saison estivale - Retour 33-35 °C en fin de saison
 - Variation cyclique saisonnière du volume des stocks typiquement de +/- 47 000 m³ sur un total de 62 000 m³
 - Echanges thermiques Hiver / Eté équilibrés jusqu'à 1,8 GWh

Vis-à-vis de la configuration A) ci-dessus, l'objectif des investigations autour des configurations B) et C) est de vérifier s'il est techniquement envisageable et intéressant de mieux contrôler le comportement thermique du stockage en aménageant un obturateur semi-étanche, l'objet étant de pouvoir imposer une température dans chacun des deux stocks, ainsi différenciés.

Le gain recherché se matérialise :

- 1) pour les deux configurations B) et C), au niveau de la performance des machineries thermodynamiques réparties le long du réseau en boucle tempérée, la température distribuée étant alors plus chaude en saison hivernale et plus froide en saison estivale.
- 2) pour la seule configuration C), par une variation cyclique du volume utile des stocks se traduisant par un ΔT effectif de 25 °C pour plus de 75 % du stockage.

Sur le principe, la configuration B) envisage la pose d'un obturateur fixe alors que la configuration C) envisage la mise en place d'un obturateur mobile se déplaçant en phase avec les échanges thermiques. Techniquement, on considère que l'obturateur n'a pas à être rigoureusement étanche car sa fonction est uniquement de limiter les phénomènes d'échange thermique de part et d'autre, notamment en contrant les phénomènes de convection au niveau dudit obturateur. En effet, dans un puits comme le Puits Y, les phénomènes de convection naturelle tendent à très rapidement homogénéiser la température de la colonne d'eau à une valeur correspondant à la moyenne. Cette convection restera opérante dans chacun des deux stocks.

Même si les équipements géothermiques en boucle ouverte de type PACP sont envisageables dans les deux cas, ces deux configurations restent compatibles avec la mise en place de sondes coaxiales en boucle fermée, la difficulté restant de plaquer ces équipements le long des parois qui n'ont pas été nettoyées à la fermeture des activités minières.

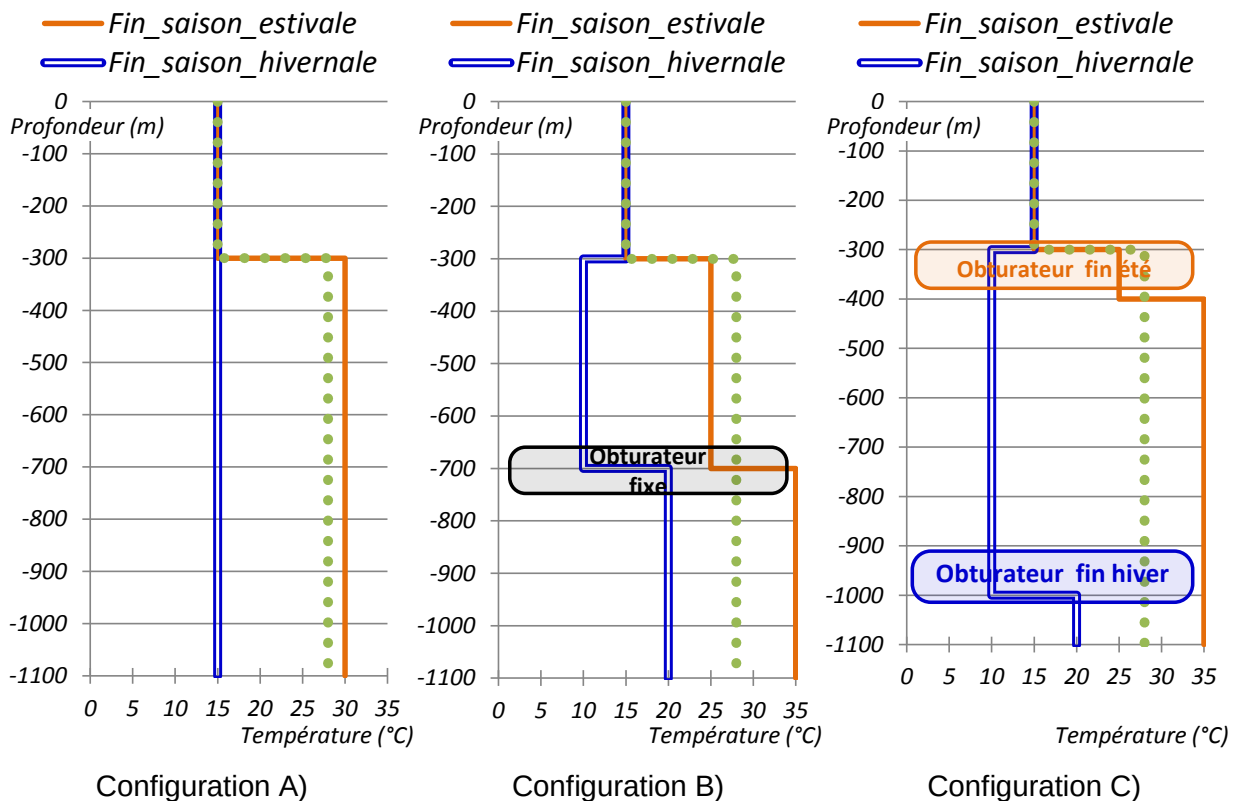


Figure 53 : Comparaison des profils de température recherchés pour les configurations B) et C) vis-à-vis de la configuration A) de référence.

Par simplification, on admettra pour tous les stocks considérés que le ΔT , entre la fin de la saison hivernale et la fin de la saison estivale, est de l'ordre de 15 °C (Figure 53).

Vis-à-vis de la configuration A), les configurations B) et C) proposent un stock "frais", localisé en partie haute, dont la température varie de 10 °C en fin de saison hivernale à 25 °C en fin de saison estivale alors que le stock "tiède", en partie basse, varie de 20 °C en fin de saison hivernale à 35 °C en fin de saison estivale (Figure 54).

Vis-à-vis de la configuration B), la différence de comportement de la configuration C) réside dans une variation des volumes des deux stocks en phase avec la saison ; le volume du stock frais diminuant en cours de la saison estival autant que le volume du stock tiède augmente, et inversement en saison hivernale.

Pour la configuration B) si on admet que le volume d'eau du Puits Y est de l'ordre de 62 000 m³, alors il s'agira de gérer deux stocks de 31 000 m³ chacun : ce qui semble pouvoir être obtenu avec des équipements géothermiques de type "sonde coaxiale" réparties le long des parois et dont la hauteur utile est la profondeur envoyée. Une solution de type PACP est envisageable en implantant un équipement dans le stock supérieur et un équipement dans le stock inférieur. Dans ce cas, on peut opérer une répartition des températures au niveau de l'échangeur primaire en surface.

Pour la configuration C), les deux recettes du Puits Y interdisent la descente de l'obturateur jusqu'en bas et restreignent ainsi de 5 000 m³ à 6 000 m³ la variation du volume d'eau. L'opération avec des équipements de type PACP paraît plus complexe que celle par des équipements de type "sonde coaxiale" mais plus facile à dimensionner.

5.4.1. Principales caractéristiques du fonctionnement de la configuration B) :

- Deux volumes de 31 000 m³ représentant chacun un stock thermique de 0,65 GWh en tenant compte du volume des roches thermiquement impactées. Le stock thermique saisonnier est donc estimé à hauteur de 1,3 GWh comme pour la configuration A) mais, vis-à-vis de celle-ci, le ΔT exploitable est de 25 °C au lieu de 15 °C.
- En saison hivernale, la température théorique de déstockage du stock inférieur varie de 35 °C à 20 °C pendant que le stock supérieur varie de 25 °C à 10 °C
- En saison estivale, la température théorique de déstockage depuis le stock supérieur varie de 10 °C à 25 °C pendant que la température du stock inférieur remonte de 20 °C à 35 °C

5.4.2. Principales caractéristiques du fonctionnement de la configuration C) :

- Un volume d'approximativement 47 000 m³ au moins, pour lequel, comme visualisé en Figure 53, le ΔT effectif ressort à 25 °C représentant une énergie de 1,5 GWh en tenant compte du volume des roches thermiquement impactées
- Deux volumes en haut et en bas qui, cumulés, représentent au maximum 15 000 m³ dont le ΔT unitaire effectif ressort à 15 °C ; ce qui correspond à une énergie de 0,3 GWh en tenant compte des roches impactées.
- Au total, le stock thermique saisonnier théorique serait donc de 1,8 GWh.

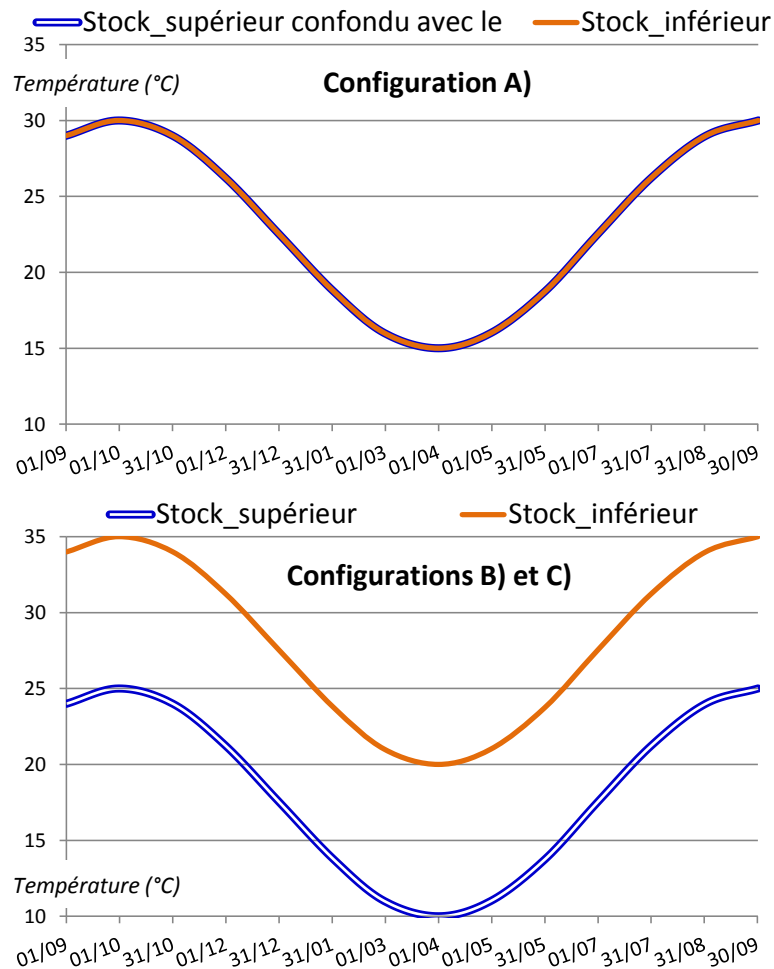


Figure 54 :Cycles thermiques saisonniers théoriques des configurations A), B) et C)

5.4.3. Discussion et conclusions intermédiaires

Pour les deux configurations B) et C), il est fait l'hypothèse que la température de retour réseau en fin de saison hivernale peut descendre sous 10 °C alors que pour la configuration A) c'est une valeur de 15 °C qui avait été retenue. A l'inverse, la température en fin de saison estivale admet un rejet au-dessus de 35 °C. De fait, le ΔT entre le départ et le retour réseau est étendu à 25 °C vis-à-vis de la configuration A) pour laquelle le ΔT était typiquement de 15 °C. Afin d'optimiser les performances des machineries thermodynamiques au niveau des sous-stations, il peut alors être envisagé de préférer un réseau d'énergie en 3 ou 4 tubes (Figure 55) qui permet de valoriser un niveau intermédiaire de la température sans nécessairement modifier les équipements géothermiques.

Du point de vue de la ressource (stocks thermiques dans le Puits Y), cela est rendu possible par le découplage des deux stocks, ce qui permet d'optimiser les températures de production vis-à-vis de la configuration A) : les gains étant, du moins sur le papier, de l'ordre de 5 °C en mode hivernal comme en mode estival.

Pour la configuration B), vis-à-vis de la configuration A), le stock thermique saisonnier est du même ordre de grandeur. C'est donc le niveau plus favorable de la température de production qui procure théoriquement un avantage à la configuration B).

Pour la configuration C) outre le gain sur la température de production vis-à-vis de la configuration A), les volumes utiles des stocks seraient accrus de l'ordre de 30% à 40%, procurant un gain supplémentaire théorique vis-à-vis de la configuration B).

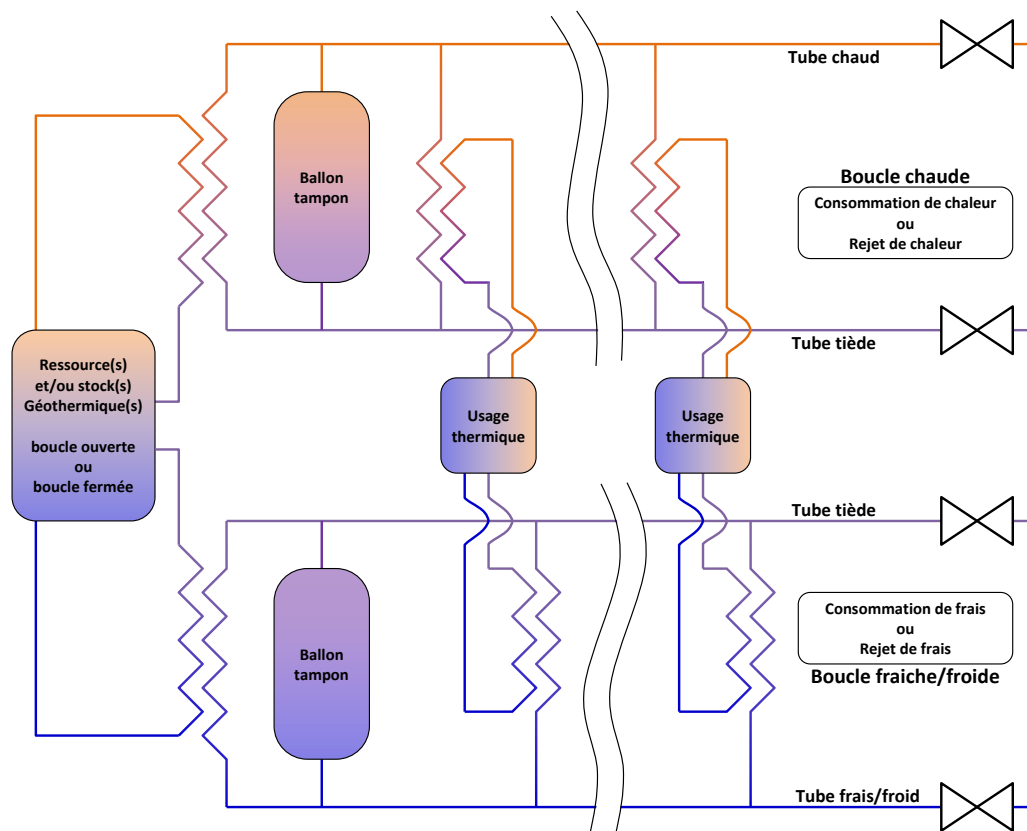


Figure 55 : Réseau 3 ou 4 tubes envisageable pour les configurations B) et C) – Pompes non représentées (source : BRGM, 2015)

Quels gains la configuration B) peut-elle réellement représenter ?

D'un point de vue théorique, l'intérêt de la configuration B) réside dans le gain de performance obtenu par l'augmentation de la température pour le début de la saison hivernale et par la baisse de la température disponible en début de saison estivale ; ce gain en performance devant se traduire par une augmentation des échanges d'énergie thermique avec le Puits Y en saison hivernale et une baisse des échanges d'énergie thermique en saison estivale. Dans les deux cas, les énergies en question correspondent à l'énergie électrique économisée.

La question reste d'évaluer si ces gains espérés sont réels et significatifs ou non.

Pour cela, il est proposé de reprendre le cas de figure appliqué à la configuration A) portant sur les 48 000 m² de la ZA Morandat auxquels sont ajoutés 20 000 m² de logements. Comme le montrent les Figure 56 et Figure 57 ci-dessous, les performances indicatives des machineries thermodynamiques sont à la hausse comme l'indiquent les améliorations du COP et de l'EER.

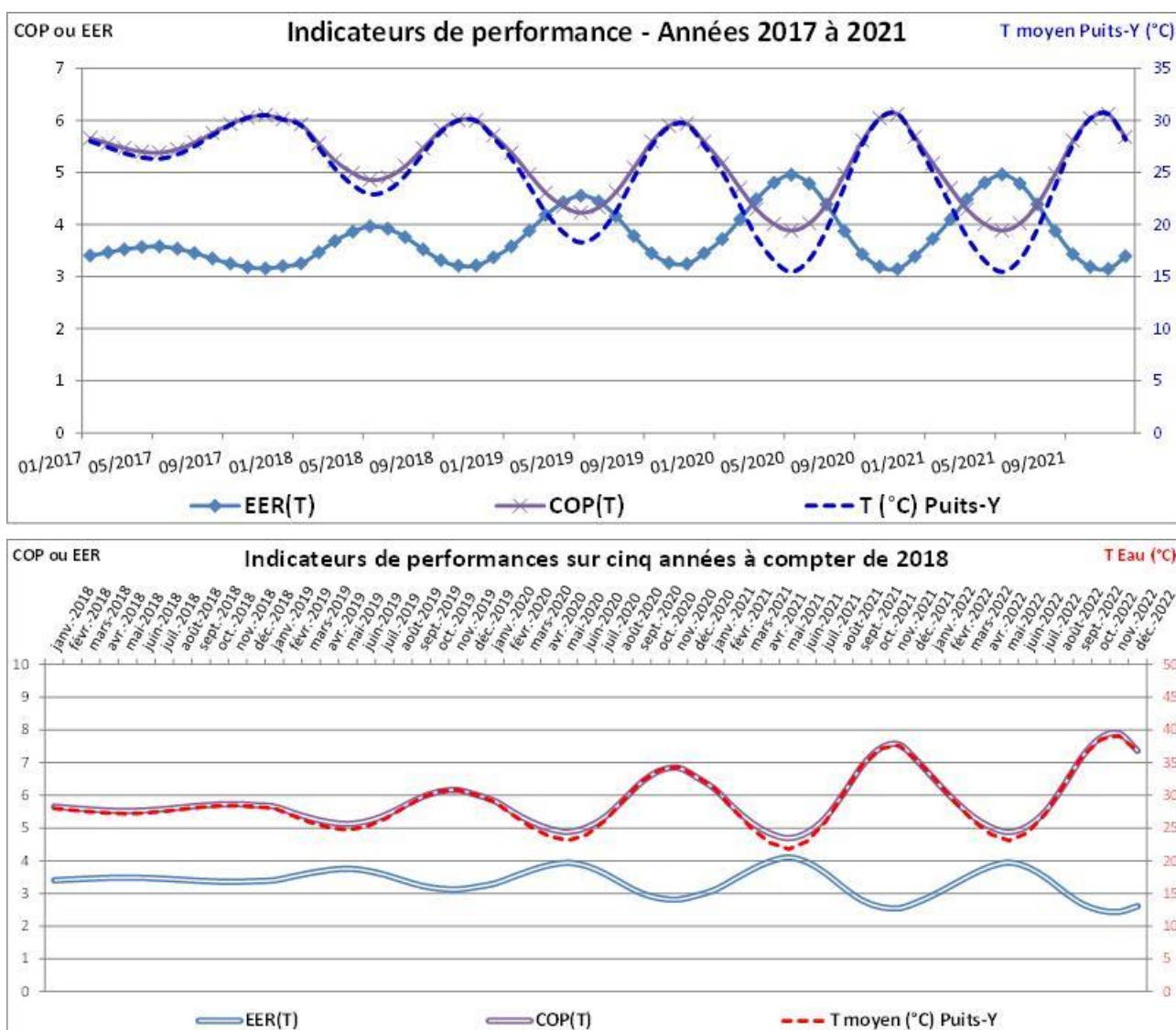


Figure 56 : Rappel des Indicateurs de performance pour le système comportant 65 500 m² raccordés, dont 17 000 m² en rafraîchissement direct

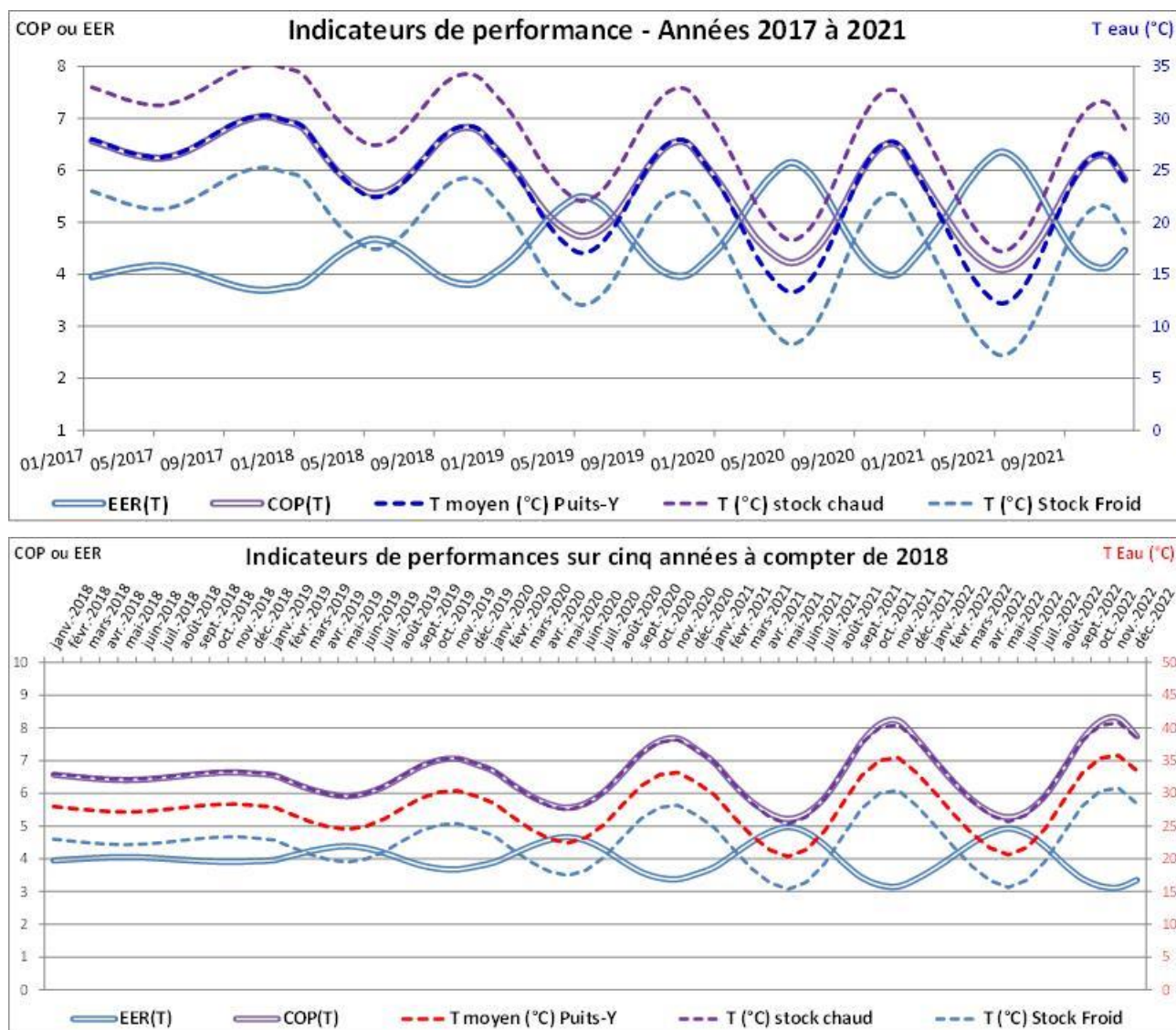


Figure 57 : Indicateurs de performances envisageables avec la configuration B)

Pour autant, malgré l'amélioration des performances des machineries thermodynamiques du fait de l'optimisation du COP et de l'EER, les gains en matière d'économie d'électricité resteront relativement limités comme on peut le déduire du Tableau 19 ci-dessous qui compare la configuration A) et la configuration B).

En effet, les estimations à 4 / 5 ans indiquent un échange augmenté en saison hivernale de seulement 20 à 30 MWh alors qu'en saison estivale, le gain est de l'ordre de 100 à 110 MWh ; ce qui procure au total un gain annuel de l'ordre de 130 MWh. Au court indicatif de l'électricité de 100 € par MWh, ce gain représenterait une économie de l'ordre de 13 000 €.

	Système de référence Configuration A) limité à la ZA Morandat		ZA Morandat avec l'ajout de 20 000 m ² de logements supplémentaires			
			Configuration A)		Configuration B)	
	Hiver (MWh/an)	Eté (MWh/an)	Hiver (MWh/an)	Eté (MWh/an)	Hiver (MWh/an)	Eté (MWh/an)
2017	229.2	-360.3	229.2	-360.3	236.8	-346.0
2018	452.5	-744.5	883.5	-608.3	913.9	-577.0
2019	696.0	-1 171.8	1 083.7	-973.4	1 113.6	-921.1
2020	965.3	-1 612.9	1 303.0	-1 302.6	1 331.4	-1 230.9
2021	992.1	-1 750.3	1 302.9	-1 302.6	1 320.7	-1 226.0

Tableau 19 : Echanges thermiques saisonniers avec le Puits Y sur 5 ans
Comparaisons des la Configuratio A avec la configuration B)

A retenir : En première approche, l'intérêt de la configuration B) paraît limité, cela d'autant plus qu'il ne procure pas d'accroissement des capacités de stockage thermique du Puits Y.

Quels gains la configuration C) peut-elle réellement représenter ?

D'un point de vue théorique, la configuration C) fonctionne sur les mêmes bases thermiques que la configuration B) mais procurerait des volumes utiles des stocks thermiques plus élevés de 30 % à 40 % en début des saisons hivernale et estivale.

A retenir : Vis-à-vis des configurations A) et B), à la condition que les demandes géothermiques hivernales et estivales restent équilibrées, le gain de capacité procuré par la configuration C) permettrait le raccordement de 30 % à 40 % de surfaces supplémentaires, ce qui, en première approche, représenterait un cumul des surfaces raccordables à plus de 80 000 m². Cela se fera évidemment sous réserve que les demandes thermiques hivernales et estivales se compensent exactement.

Reste que le déplacement de l'obturateur mobile pourrait se révéler compliqué du point de vue technique. Il pourrait également être moins efficace qu'un obturateur immobile pour limiter les échanges thermiques entre le stock supérieur et le stock inférieur.

5.5. EXAMEN DE LA CONFIGURATION D) DANS LE PUITS Y

- **Aménagement d'un obturateur étanche dans le Puits Y**
- **Ennoiement possible du Puits Y jusqu'à pratiquement 1 100 m**
- **Distribution en réseau "3 ou 4 tubes" de type "boucle tempérée"**

- **Pour la configuration D) en boucle fermée (sondes coaxiales)**
 - Volume de chacun des stocks de l'ordre de 43 000 m³
 - ΔT dans chacun des deux stocks d'environ 15 °C
 - ΔT effectif entre départ et retour réseau jusqu'à 25 °C
 - Départ 33-35 °C en début de saison hivernale - Retour 10-12 °C en fin de saison
 - Départ 10-12 °C en début de saison estivale - Retour 33-35 °C en fin de saison
 - Echanges thermiques Hiver / Eté équilibrés jusqu'à 1,8 GWh

- **Pour la configuration D) en boucle ouverte avec vidage du stock supérieur**
 - ΔT effectif entre départ et retour jusqu'à 25 °C
 - Départ 33-35 °C toute la saison hivernale - Retour 13-15 °C en fin de saison
 - Départ 13-15 °C en début de saison estivale - Retour 33-35 °C toute la saison
 - Variation cyclique saisonnière du volume des stocks jusqu'à +/- 78 000 m³
 - Echanges thermiques Hiver / Eté équilibrés jusqu'à 2,6 GWh (théorique)

L'aménagement du Puits Y pour la configuration D) impose la réalisation d'une obturation étanche devant pouvoir supporter d'importants différentiels de pression. Cet aménagement doit en outre permettre le passage des équipements géothermiques, ce qui reste un verrou technologique en l'absence de référence connue.

5.5.1. Configuration D) et exploitation en boucle fermée

Cette première variante correspond à un bouchon étanche implanté à 550 m de profondeur. Le fonctionnement peut être opéré en boucle ouverte mais la préférence semble aller au principe de la sonde coaxiale qui reste le plus simple à exploiter une fois en place.

La pression différentielle à supporter par le bouchon correspond à une hauteur d'eau de l'ordre de 300 m qui résulte du remplissage des 24 000 m³ supplémentaires qu'il n'est pas possible actuellement d'envoyer du fait de la conduction hydraulique dans les anciennes galeries de la mine. La question reste donc posée d'équiper le système de moyens de remplissage et de compensation des pertes hydrauliques éventuelles.

Hormis l'augmentation des volumes des stocks, le fonctionnement de cette première variante (Figure 58) reste similaire à celui de la configuration B) ci-dessus dont l'intérêt est insuffisant du fait de gains minimes vis-à-vis de la configuration A) faute de volumes de stocks suffisants.

La traduction énergétique de l'augmentation des volumes des stocks est une capacité de chacun des stocks saisonniers portée au-delà de 1,8 GWh au lieu de 1,3 GWh pour les Configuration A) et Configuration B).

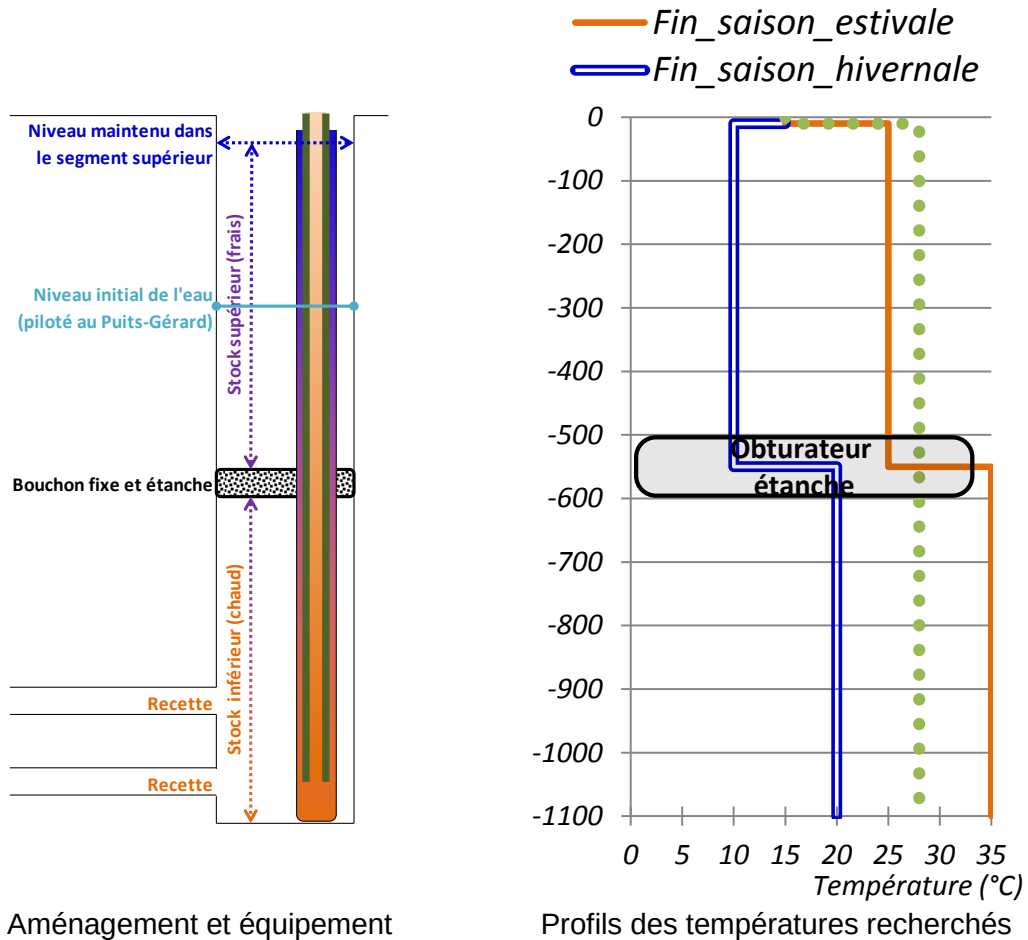


Figure 58 : Schémas descriptifs de la configuration D) avec équipement de type sonde coaxiale

5.5.2. Configuration D) et exploitation en boucle ouverte

Sur la base du même aménagement que ci-dessus, l'exploitation au moyen d'équipements de type PACP de la configuration D) peut se révéler significativement plus ambitieuse si elle est jugée techniquement et économiquement faisable.

Techniquement, l'aménagement du Puits Y correspond à un bouchon étanche implanté au-delà de 1 000 m de profondeur mais juste au-dessus des recettes mettant en communication le Puits Y avec les galeries de l'ancienne mine.

L'équipement est alors impérativement sur le principe PACP en boucle ouverte, l'objectif étant d'exploiter les volumes limitrophes dans les anciennes galeries à concurrence du volume supérieur au bouchon étanche dans le Puits Y et pouvant atteindre de l'ordre de 78 000 m³.

Comme esquissé en Figure 59, en saison hivernale, l'eau puisée au travers des recettes peut être considérée comme étant d'une température constante, typiquement au moins égale à 33 ou 35 °C. Avec un réseau 3 ou 4 tubes, la température de retour pourrait permettre une température de remplissage du stock supérieur jusqu'à 10 °C ; ce qui procurerait un ΔT effectif pouvant alors atteindre de 25 °C. En saison estivale, les températures de production et de réinjection sont inversées.

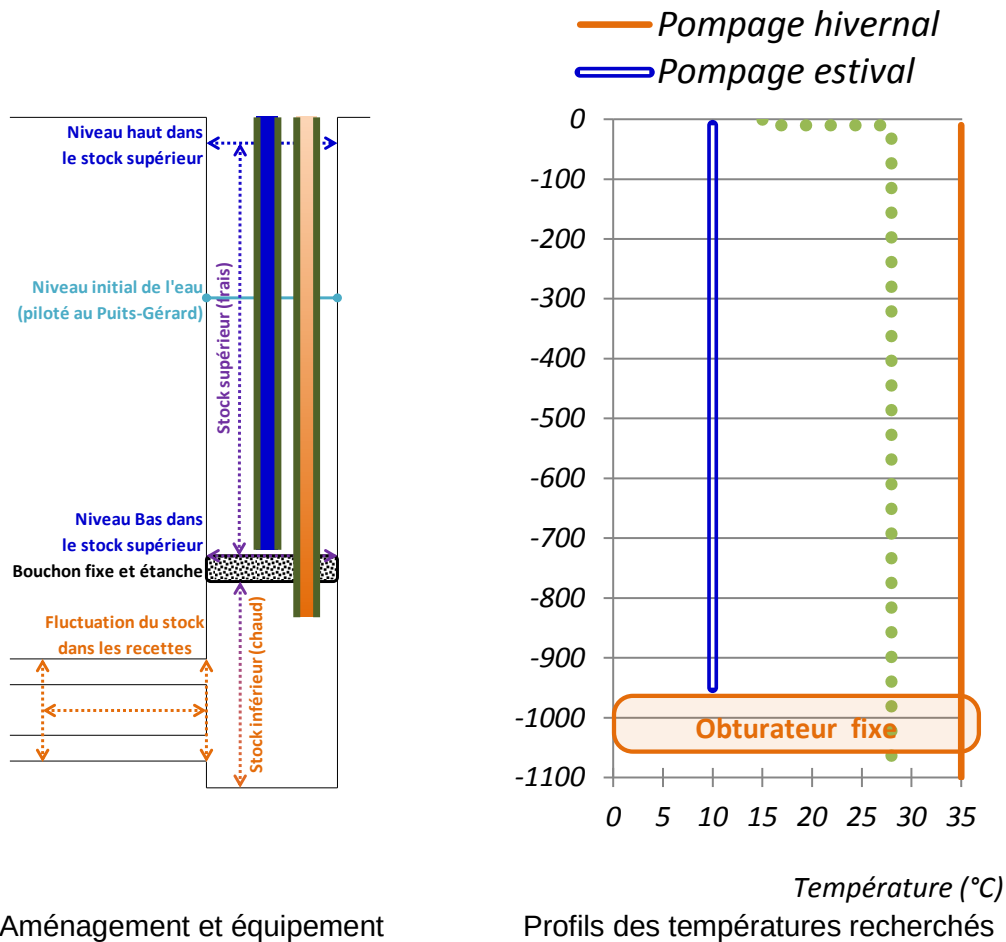


Figure 59 : Schémas descriptifs de la configuration D) avec équipement de type PACP

5.5.3. Discussion et conclusions intermédiaires

La capacité théorique maximale de stockage saisonnier pour 78 000 m³ et 25 °C de ΔT ressortirait au-delà de 2,6 GWh en tenant compte des roches avoisinantes contribuant au stockage périodique. Cependant, les températures naturelles des formations sont plus élevées que celles du stock supérieur ; ce qui conduirait, du moins les premières années, à des pertes thermiques abaissant la performance de la saison estivale mais pas nécessairement celle de la saison hivernale.

Reste que la pression différentielle maximale qui pourrait être à supporter par le bouchon étanche correspondrait à une hauteur d'eau de l'ordre de 700 m qui résulterait cycliquement du vidage complet du volume au-dessus du bouchon étanche. Comme il est certain qu'un obturbateur gonflable ne pourrait satisfaire toutes les conditions requises, la coulée d'un bouchon en béton à ancrer solidement dans les parois serait à prévoir.

Il s'agit là d'un verrou technologique du même ordre que celui des pompes immergées devant produire la pression de refoulement pour une hauteur de colonne de plus de 1 000 m, en fin de saison estivale comme en début de saison hivernale.

Néanmoins, l'enjeu est le doublement de la capacité des stocks thermiques du Puits Y.

6. Phase 1 : Technologie alternative à haute température

6.1. OBJECTIFS ET ETAT DE L'ART

En gérant le Puits Y comme un stockage avec un ΔT été/hiver de 15 °C maintenu sous 30 °C, la solution de référence a pour objet de satisfaire l'ensemble des besoins en matière de chauffage et de rafraîchissement / refroidissement des locaux ; cela nécessairement au moyen de pompes à chaleur pour les deux usages.

En gérant le Puits Y comme un stockage maintenu au-dessus 35-40 °C, La solution alternative d'exploitation du Puits Y a pour objet de spécialiser le Puits Y pour l'application de chauffage direct, c'est-à-dire sans qu'il soit nécessaire de recourir à des pompes à chaleur. A Gardanne, les besoins en climatisation seraient alors couverts directement par les énergies thermiques pouvant être stockées dans le Puits Y.

Cette solution n'est donc envisageable qu'à la condition de disposer d'une énergie thermique excédentaire devant être temporairement stockée dans le Puits Y pour pouvoir être employée pour le chauffage des bâtiments.

Deux sources de cette nature semblent pouvoir être disponibles sur le secteur de Gardanne :

1. Une source fatale provenant soit des excédents thermiques des installations industrielles de production d'alumine à spécialité par l'usine ALTEO, localisée à quelques centaines de mètres de la ZA Morandat, soit de ceux de la centrale thermique à quelques kilomètres.
2. La ressource solaire locale qui serait à capter au moyen de panneaux, de préférence répartis en toiture des futures constructions mais pouvant, par exemple, également être placée en couverture des parkings. **C'est précisément cette solution qui est examinée par la présente étude car elle peut être répliquée dans toute la région PACA.**

Dans les deux cas, l'utilisateur final aura donc à sa disposition un système hybride répartissant l'énergie thermique pour le chauffage en fonction de sa disponibilité, le Puits Y garantissant la fourniture d'énergie thermique lors des périodes d'indisponibilité des autres ressources fatales ou renouvelables.

Concernant le rafraîchissement, des solutions conventionnelles sont à mettre en place.

A retenir : L'intérêt premier de la solution alternative de stockage à relativement haute température (moins de 70°C) vis-à-vis à la solution de référence réside dans l'usage direct de la chaleur pour les applications de chauffage du fait d'un niveau de la température permettant d'éviter le recours à des pompes à chaleur.

L'inconvénient est que le rafraîchissement des locaux reste confié à d'autres moyens et qu'il faut capter une énergie thermique fatale ou renouvelable.

L'intérêt additionnel d'une haute température, si possible supérieure à 85 °C en combinant les sources, serait par exemple de permettre l'utilisation de groupes frigorifiques à sorption avec des rendements intéressants. L'inconvénient est que de tels systèmes restent peu répandus en France, ce qui en rend difficile l'évaluation économique à ce jour.

6.1.1. Utilisation de la chaleur pour le chauffage direct

En référence aux exemples technico-économiques énumérés au chapitre 4, cette solution alternative d'exploitation du Puits Y pour le chauffage direct s'apparenterait au cas de l'installation de Marstal "Sunstore 4" au Danemark qui exploite un réservoir enterré de 75 000 m³ d'eau pouvant être portée à 90°C à partir d'une source solaire.

La capacité théorique du stockage de Marstal est estimée pour une échelle de température entre 10 °C et 90°C, soit un ΔT de 80°C. Or, la température la plus basse en exploitation à Gardanne s'établit au-dessus de 30 °C dans les couches inférieures du stockage et la température la plus haute n'atteint que 80°C dans la couche supérieure du stockage.



Figure 60 : Vue du champ solaire et du stockage en cours de construction à Marstal, Danemark

Ramenées aux valeurs moyennes de la température du stock, la température moyenne la plus basse en usage direct est de l'ordre de 40 °C alors que la température moyenne la plus élevée procurée par les panneaux solaires dans le stockage est de l'ordre de 75 °C, soit un ΔT d'exploitation de l'ordre de 30 °C à 35 °C correspondant à un stock thermique réellement exploitable en usage direct de l'ordre de 3 GWh.

Pour mémoire, la réalisation du stockage de 75 000 m³ à Marstal représente un investissement de 2,65 M€ HT pour la capacité toute théorique de stockage de 7 GWh, soit 35,5 €/m³ ou 0,38 €/kWh installé. Ramené à la capacité effective en usage direct de 3 GWh, l'investissement remonte donc à 0,89 €/kWh installé.

6.1.2. Utilisation de la chaleur pour produire également de l'eau glacée

L'hypothèse d'une production d'eau glacée à partir de la chaleur se réfère le plus souvent à la technologie des pompes à chaleur à sorption (Voir Annexe 5). Certaines installations, assez rares, recourent à du stockage saisonnier, par exemple l'installation de Dronninglund construite en 2013 au Danemark dont le schéma de principe est reproduit par la Figure 61 ci-dessous ; le stockage de type PTES (réservoir enterré) représentant 60 000 m³ d'eau et étant en cela comparable au Puits Y.

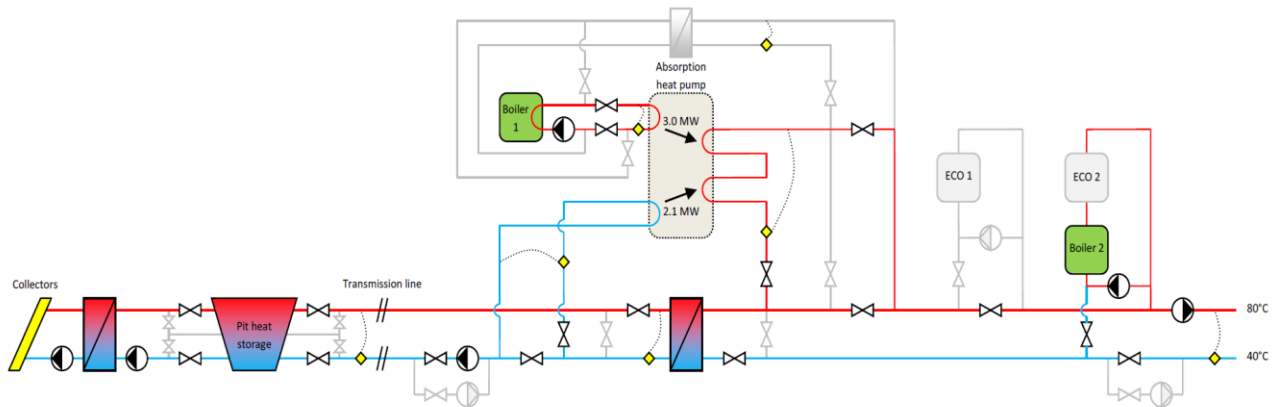


Figure 61 : Schéma logique de l'installation de stockage de Dronninglund, Danemark



Figure 62 : Vue du champ solaire et du stockage de Dronninglund, Danemark

La réalisation du stockage de Dronninglund a représenté un investissement de 2,3 M€, soit 0,416 €/m³ hors l'investissement pour le champ de 37 573 m² de panneaux solaires plans, pour les pompes à chaleur à absorption de 2,1 MW de puissance frigorifique et pour les autres composants comme les brûleurs d'appoint.

De telles installations hybrides solaire / stockage / absorption ne semblent pas exister en France alors que les apports solaires sont pourtant plus importants, de même que les besoins en rafraîchissement.

6.2. ORDRES DE GRANDEUR POUR L'ENSEMBLE DES BESOINS THERMIQUES

En première approche, on peut se faire une idée de la surface en capteurs solaires plans qui serait nécessaire pour assurer tous les besoins thermiques de la ZA Morandat, pour l'hypothèse de 65 500 m².

6.2.1. Hypothèse pour une source d'origine solaire

L'irradiation solaire moyenne sur le secteur de Gardanne est de l'ordre de 4,3 kWh/m².jour ; ce qui représente 1,57 MWh/m².an. En admettant que 40 % de cette énergie incidente peut être convertie en énergie thermique à suffisamment haute température, on obtient une production d'énergie thermique de 0,63 MWh/m².an, qui peut donc être directement dévolue au chauffage et à l'eau chaude sanitaire.

Pour la production d'eau réfrigérée, on peut considérer qu'une énergie thermique de 1 kWh permet la production de l'ordre de 0,5 à 0,6 kWh d'énergie frigorifique à l'aide d'une machinerie à sorption ; ce qui, ramené à l'unité de surface de panneau solaire thermique représenterait de 0,35 à 0,40 MWh/m².an en production d'eau réfrigérée.

Si de l'énergie solaire doit transiter par le stockage saisonnier, alors il est nécessaire de prendre en considération des pertes thermiques annuelles que l'on peut évaluer *a minima* à 10 % et typiquement à moins de 30 %.

6.2.2. Reformulation des demandes du bâti

En notant que le rafraîchissement direct ne peut être envisagé en l'absence de ressource adaptée, les demandes maximales pour la ZA Morandat sont alors les suivantes en assurant la climatisation par machinerie thermodynamique à sorption et en considérant, par simplification, que les niveaux supérieurs de tous les bâtiments neufs (17 031 m²) sont rafraîchis à hauteur de 10 kWh/m².an et non pas 25 kWh/m².an :

	Chauffage kWh/m ² .an	ECS kWh/m ² .an	Rafraîchissement kWh/m ² .an
Tertiaire rénové	40	5	50
Entreposage	40	0	0
Centre-Multi-Culturel	40	5	10
Hôtellerie	20	20	25
Tertiaire-neuf rafraîchi	20	5	10
Tertiaire neuf climatisé	20	5	25
Hôtel Entreprises	40	5	25

Tableau 20 : Demandes annuelles spécifiques en énergies utiles

Avec les conditions ci-dessus, les énergies thermiques utiles (ou finales) annuelles sont alors celles indiquées dans le Tableau 21 ci-dessous montrant à la fin du programme de construction une demande utile en chaleur de 1 845 MWh/an et en eau réfrigérée de 1 325 MWh/an. Cette dernière valeur correspond à une demande en énergie thermique en entrée de la machinerie à sorption de l'ordre de 2,2 GWh/an.

	Surfaces	Chauffage	ECS	Rafrachissement	<i>Energie pour sorption</i>
	m ²	MWh/an	MWh/an	MWh/an	MWh/an
Tertiaire rénové	1 060	42	5	53	88
Entreposage	640	26	0	0	0
Centre-Multi-Culturel	4 440	178	22	44	74
Hôtellerie	3 500	70	70	88	146
Tertiaire neuf rafraichi	17 031	341	85	170	284
Tertiaire neuf climatisé	36 981	740	185	925	1 541
Hôtel Entreprises	1 800	72	9	45	75
Totaux	65 452	1 468	377	1 325	2 208

Tableau 21 : Demandes annuelles cumulées, exprimées pour le cas de 65 500 m²

Il est important de remarquer que lorsque le rafraichissement des locaux est opéré à l'aide de machineries à sorption, alors seule de la chaleur est nécessaire ; cette chaleur pouvant provenir indifféremment et éventuellement en combinaison :

- D'une source fatale
- D'une source solaire
- Du stockage dans le Puits Y

Pour ce qui est du stockage dans le Puits Y, il sera nécessaire de préalablement y accumuler de l'énergie thermique, ce qui revient à porter le stockage à une température significativement supérieure à sa température naturelle non perturbée.

Dans ces conditions, il est évident que le stockage n'est d'aucune utilité si l'énergie issue de la source fatale est surabondante en toutes circonstances ; ce qui n'est pas le cas si c'est une ressource solaire qui est disponible.

6.2.3. Estimation empirique de la surface de panneaux solaires

En s'inspirant des installations de Marstal et de Dronninglund prises pour illustration ci-dessus, l'utilisation du Puits Y comme stockage saisonnier paraît envisageable. Il faudra pour cela assurer une température en entrée des groupes à absorption supérieure à 80°C et, *a minima*, de 60°C. Cela paraît envisageable sans nécessairement obtenir une telle température dans le Puits Y, par exemple à l'aide de petits stockages court-terme combinés à des panneaux solaires plans en phase avec la demande en climatisation. En outre, ils peuvent assurer la fourniture de l'ECS.

Pour effectuer un premier calcul estimatif de la surface de panneaux solaires qui serait à implanter, on propose d'employer les hypothèses empiriques suivantes :

Taux de conversion de l'énergie solaire en énergie thermique	40 %
Taux global de réutilisation de l'énergie thermique en tenant compte de la fraction stockée dans le Puits Y	90 %
Taux de conversion de l'énergie thermique en énergie frigorifique	60 %
Taux résultant de conversion de l'énergie solaire en énergie pour le chauffage ou pour l'ECS	36 %
Taux résultant de conversion de l'énergie solaire en énergie frigorifique	21,6 %

Tableau 22 : Hypothèses empiriques pour estimer les surfaces de panneaux solaires

Avec les hypothèses empiriques ci-dessus, on obtient l'estimation ci-dessous des surfaces nécessaires de panneaux solaires à implanter ; lesquelles permettraient une production d'énergie thermique d'environ 4,5 GWh/an :

Pour le chauffage :				2 594 m ²
Pour l'ECS :				666 m ²
Pour la climatisation :				3903 m ²
Surface totale estimée pour les panneaux solaires thermiques :				7 164 m²
Mois	Rayonnement Solaire incident			Production d'énergie thermique pour 7 164 m ² de panneaux
	kWh/m ² /j	kWh/m ² /mois	%	
Janvier	1.72	53.3	3.39%	152.8 MWh/mois
Février	2.66	74.5	4.74%	213.4 MWh/mois
Mars	4.08	126.5	8.05%	362.4 MWh/mois
Avril	5.22	156.6	9.96%	448.7 MWh/mois
Mai	6.33	196.2	12.49%	562.3 MWh/mois
Juin	7.12	213.6	13.59%	612.1 MWh/mois
Juillet	7.17	222.3	14.14%	636.9 MWh/mois
Août	6.13	190.0	12.09%	544.5 MWh/mois
Septembre	4.68	140.4	8.93%	402.3 MWh/mois
Octobre	2.98	92.4	5.88%	264.7 MWh/mois
Novembre	1.96	58.8	3.74%	168.5 MWh/mois
Décembre	1.52	47.1	3.00%	135.0 MWh/mois
Annuel	4.31	1 571.7	kWh/m².an	4 503.7 MWh/an

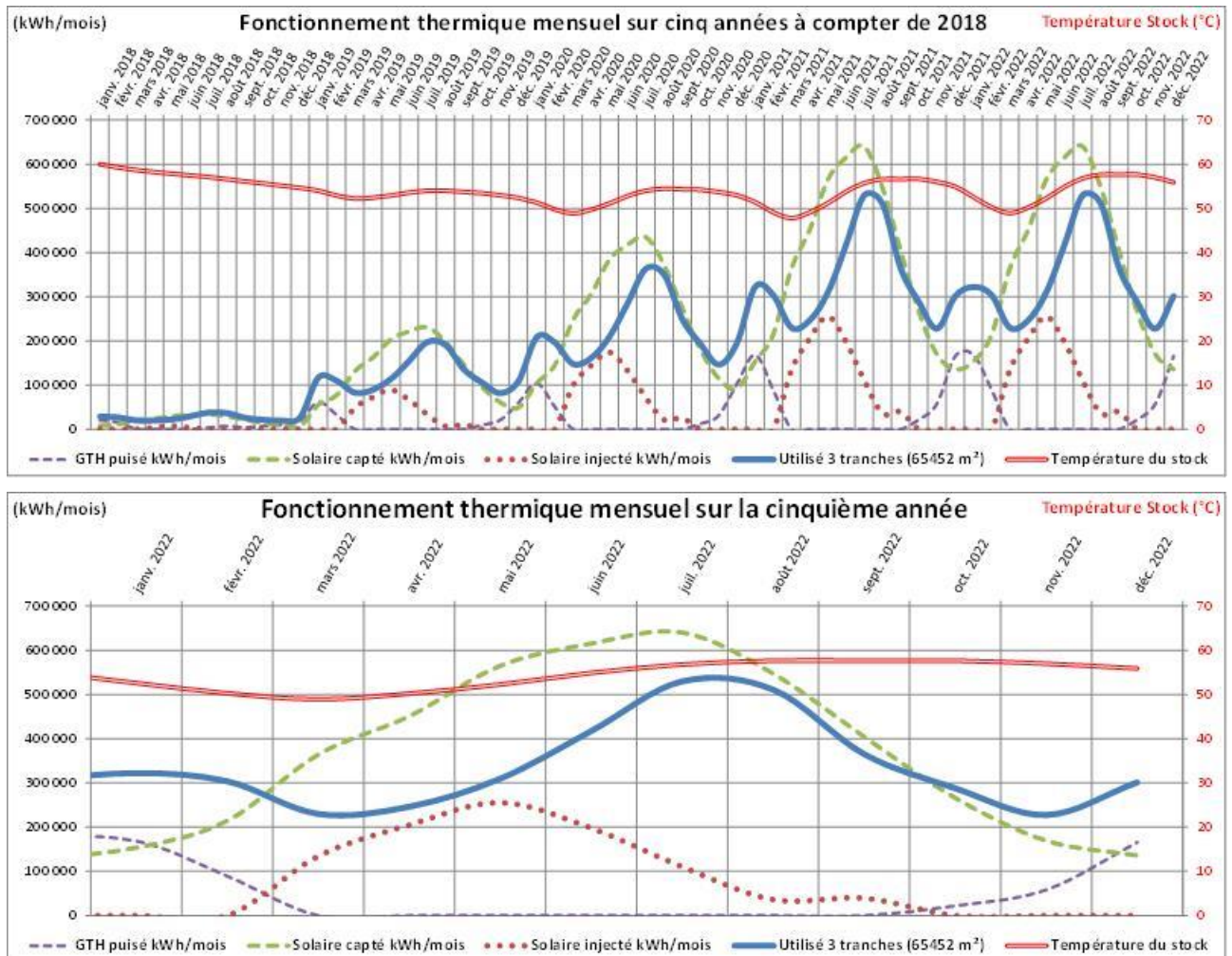
Tableau 23 : Rayonnement solaire incident sur le secteur de Gardanne et estimation des productions d'énergie thermique couvrant les besoins de la ZA Morandat

6.2.4. Validation l'estimation de la surface de panneaux solaires

Afin de valider l'hypothèse d'une surface cumulée de panneaux solaires plans de l'ordre de 7 200 m², une simulation à l'échelle du mois sur cinq années consécutives (à compter de 2018) a été effectuée avec les hypothèses suivantes à l'échelle mensuelle :

- L'énergie solaire captée est en priorité employée en usage direct
- Si toute l'énergie d'origine solaire n'est pas employée, alors la fraction excédentaire est injectée dans le Puits Y
- Si l'énergie solaire captée est insuffisante, alors de l'énergie est puisée dans le Puits Y en préchauffage
- Pour que le système puisse être pérenne, alors les pertes thermiques dans le Puits Y et les puisages de chaleur doivent être compensés par des injections de chaleur issue des excédents de production des panneaux solaires.
- L'indicateur de l'état du stockage thermique est la température dans le Puits Y

La simulation ci-dessous (Figure 63) fait débuter le processus avec une température initiale de 60°C dans le Puits Y et les panneaux solaires sont progressivement implantés au fur et à mesure des phases de construction avec le ratio de 11% de panneaux solaires thermiques rapportés à la surface SHON ; ce qui correspond in fine à 7 200 m² pour l'ensemble des 65 452 m² SHON.



La seconde simulation ci-dessous (Figure 64) fait débuter le processus avec une température initiale du 30 °C dans le Puits Y. Il est supposé une implantation initiale de 4000 m² de panneaux solaires puis, à compter de 2020 des 11% de la surface SHON ; soit 7 200 m² pour l'ensemble des 65 452 m² SHON.

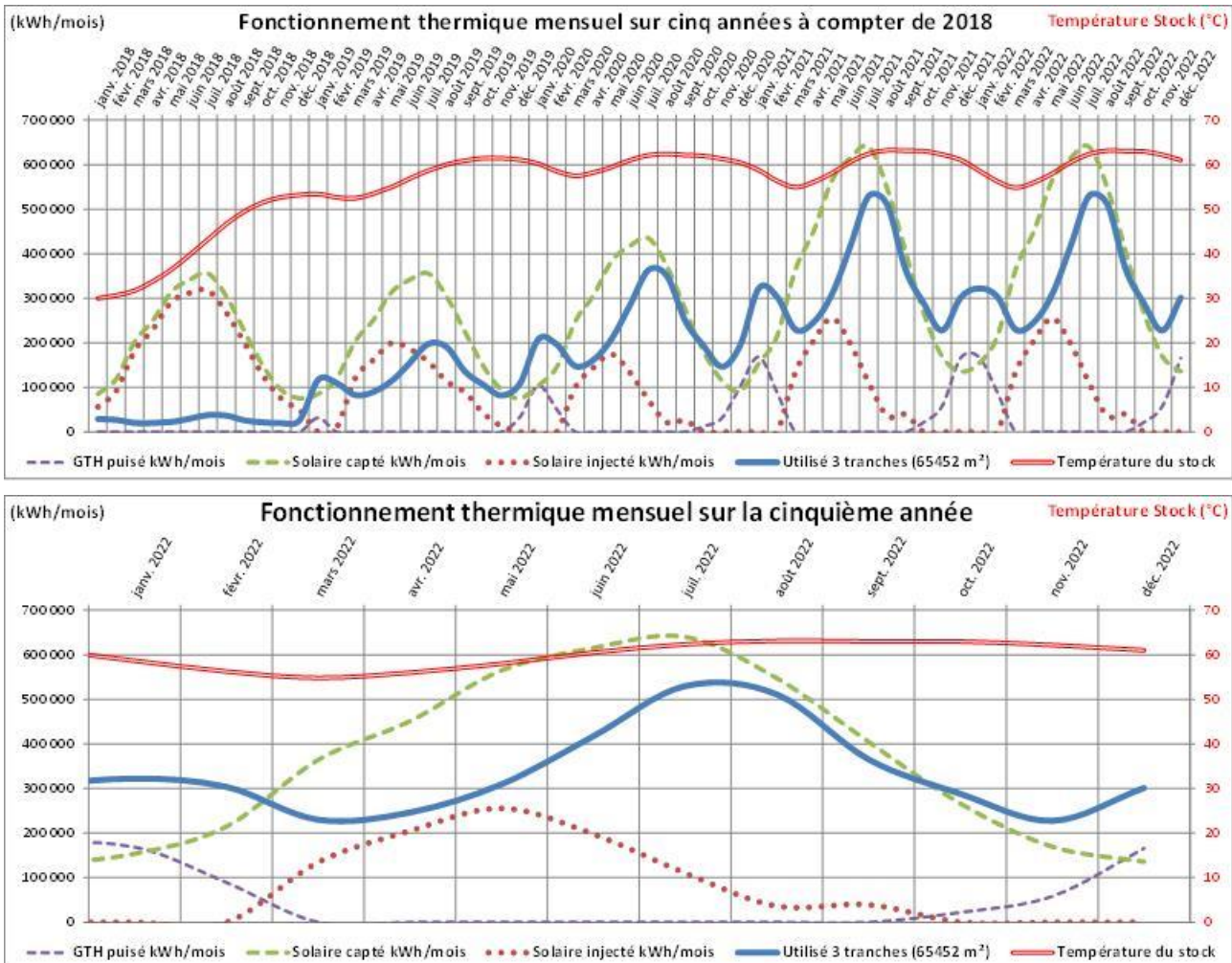


Figure 64 : Autre exemple de simulation des demandes en énergie thermique et de la température du stock – cas d'une température initiale de 30 °C

L'observation comparative des Figure 63 et Figure 64 permet de montrer que les cycles thermiques se stabilisent à compter de la quatrième année avec une surface de 7 200 m² de panneaux solaires permettant de compenser les pertes thermiques estimées dans le Puits Y pour un niveau de la température de l'ordre de 60°C.

Ces pertes sont considérées comme négligeables lorsque la température dans le Puits Y est de l'ordre de 30 °C. Les pertes annuelles sont estimées à 50 % de la capacité thermique du stockage lorsque la température annuelle moyenne est de 70°C.

Les conditions initiales impactent évidemment le niveau de la température durant les premiers cycles mais ont une incidence relativement limitée sur le niveau de la température après plusieurs cycles une fois terminé le programme de construction.

6.2.5. Puissances thermiques en jeu dans le stockage (Puits Y)

Une fois terminé le programme de construction, les énergies et puissances qui concerneraient le Puits Y sont représentées par la Figure 65 ci-dessous.

On constate que le puisage thermique en période hivernale nécessite une puissance installée inférieure à 400 kW alors que l'injection de chaleur pourrait nécessiter une puissance installée légèrement supérieure à 500 kW. Ce dernier calcul est effectué pour l'équivalent d'un temps de fonctionnement au régime nominal de 66% de la période considérée pour prendre en considération des modulations de l'ensoleillement ne pouvant être compensées si des ballons tampon suffisants ne sont pas installés.

On notera que la pointe d'injection de chaleur est constatée au mois de mai alors que la pointe de demande en climatisation est constatée en juillet/août.

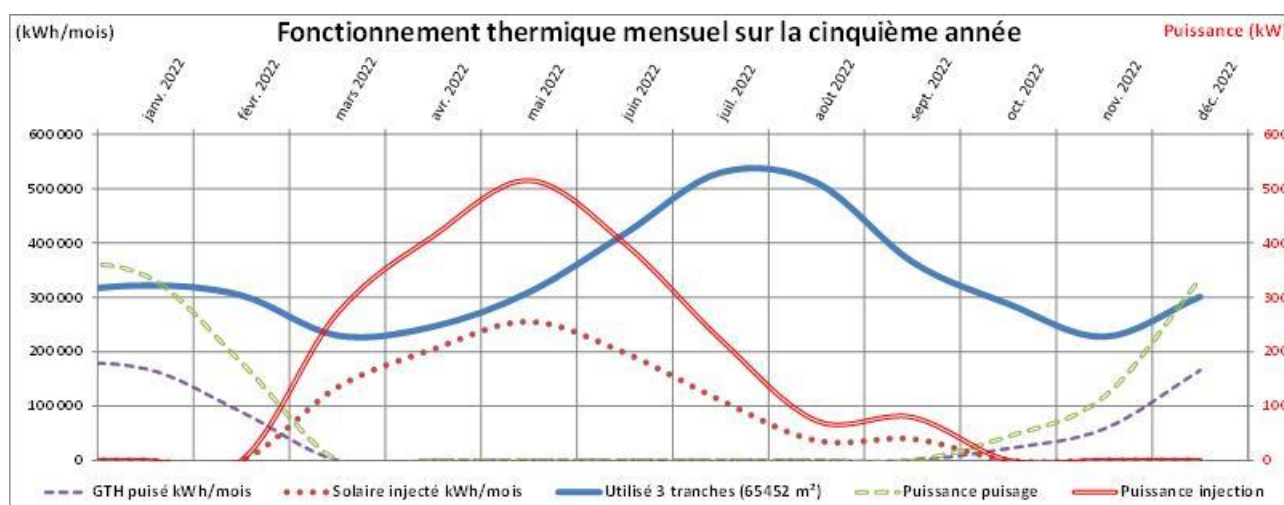


Figure 65 : Energies et puissances en jeu dans le Puits Y

6.2.6. Impacts sur le réseau de chaleur

Le réseau de chaleur serait plus proche d'un réseau de chaleur conventionnel, ne transportant que de l'eau chaude, que du réseau en boucle tempérée considéré pour la solution de référence. De ce fait, son coût pourrait être légèrement supérieur ayant à être isolé thermiquement. Toutefois, les débits maximum peuvent être réduits, ce qui pourrait compenser le différentiel de coûts, du moins en première approche.

6.2.7. Utilisation d'une source d'énergie thermique fatale

L'utilisation d'une ressource en énergie fatale paraît possible dans le secteur de la ZA Morandat où sont présentes de longue date des installations de production d'alumine de spécialité, excédentaires en énergie thermique.

En première approche, on peut considérer que les besoins en énergie thermique de récupération sont similaires à ceux évoqués ci-dessus pour une source solaire thermique si la température de cette source permet efficacement l'emploi de groupes frigorifiques à sorption, à savoir une température proche de 80°C ou plus.

Toutefois, si la source fatale est disponible en permanence, alors l'utilité d'un stockage thermique dans le Puits Y paraît assez peu probable. En tout état de cause, en l'absence d'hypothèse de travail pouvant être esquissée, aucune simulation ne peut être envisagée.

7. Phase 1 : Solution de repli sur champ de SGV

7.1. PRESENTATION

La solution de référence considérant le Puits Y comme un stockage est caractérisée par un ΔT été/hiver typiquement de 15 °C et une température maintenue sous 30 °C. Cette solution peut satisfaire l'ensemble des besoins de la ZA Morandat, alternativement en chauffage en période hivernale et en rafraîchissement / refroidissement en période estivale, avec les conditions que les puisages de chaleur et les injections de chaleur se compensent annuellement et que les locaux améliorent leur performance vis-à-vis des prévisions de l'étude BG.

La solution de repli substitue au Puits Y un champ de sondes géothermiques verticales (SGV), ou plusieurs champs plus petits, à implanter à proximité immédiate de la ZA Morandat ou dans le périmètre de la ZA Morandat.

Cette solution de repli repose sur l'hypothèse d'une température naturelle des formations rocheuses encaissantes moins élevée que la température des roches dans lesquelles est implanté le Puits Y. La température moyenne du sol sur le secteur concerné est, à proximité de la surface, de l'ordre de 14°C et la température naturelle des roches à 100 m de profondeur est de l'ordre de 17°C ; ce qui, en première approche représenterait une température moyenne de l'ordre de 15 °C à 16 °C pour un champ de sondes de 100 m de profondeur.

Selon l'agencement des sondes géothermiques dans le(s) champ(s), le volume de roches concerné se situerait typiquement entre 250 000 m³ et 800 000 m³ ; ce qui peut représenter une capacité de stockage thermique significativement supérieure à celle mobilisable par le Puits Y pour le même ΔT . Par exemple, un échange de chaleur de 5 GWh dans un grand champ de sondes pourrait n'induire qu'un ΔT de 10 °C. Dans le Puits Y, un échange de 1,3 GWh induit un ΔT de l'ordre de 15 °C. Par contre, les puissances thermiques restent du même ordre de grandeur dans les deux cas, même si les échanges thermiques par diffusion dans les milieux solides sont moins "performants" que les échanges dans l'eau d'un réservoir.

Dans ces conditions, l'objectif premier de la solution de repli en champ(s) de sondes géothermique pourrait être d'exploiter un ΔT été / hiver maximum de 10 °C, si possible maintenu sous 20 °C, soit typiquement 10 °C sous la température de la solution de référence dans le Puits Y. De la sorte, le COP moyen des machineries thermodynamiques en période hivernale serait légèrement dégradé mais, à l'inverse, l'EER serait significativement amélioré en saison estivale ; le rafraîchissement direct devenant même envisageable.

Tout comme pour la solution de référence dans le Puits Y, la problématique demeure l'équilibrage entre les puisages de chaleur en période hivernale et les injections de chaleur en saison estivale mais avec une sensibilité amoindrie. De plus, l'abaissement de température favorisant le rafraîchissement direct peut faciliter le rééquilibrage.

La solution de repli en champ(s) de sondes exploite des moyens de distribution de l'énergie dans la ZA Morandat en tous points similaires à ceux de la technologie de référence exploitant le Puits Y. Les charges d'investissements pourraient donc représenter la principale clé de décision ; des éléments en ce sens étant présentés au Chapitre 4.2 (Stockages thermiques souterrains de grande). D'autres éléments estimatifs sont présentés ci-dessous.

A retenir : Vis-à-vis de la solution de référence, la solution de repli en champ de sondes géothermique présente un niveau de la température du milieu encaissant plus favorable au rafraîchissement des locaux. Si l'investissement à consentir sur la ZA Morandat pour la solution de replis pourrait être plus important qu'une solution utilisant le Puits Y, la solution de repli peut, par contre, être plus facilement répliquée en d'autres lieux.

7.2. CAS DU CHAMP DE SONDES EN BOUCLE TEMPEREE POUR 65 000 M²

Malgré l'abaissement de la température vis-à-vis d'une solution sur le Puits Y, le fonctionnement reste significativement déséquilibré du fait d'une sollicitation estivale élevée pour satisfaire les besoins en climatisation. De ce fait, il reste fortement recommandé de privilégier le rafraîchissement direct comme le montre la comparaison des deux graphiques ci-dessous ; celui du haut utilisant la climatisation à hauteur de 25 kWh/m²/an alors que celui du bas distribue exactement la même énergie de rafraîchissement mais en rafraîchissement direct ; ce qui évite d'injecter dans le sol de l'énergie thermique prélevée dans le réseau électrique.

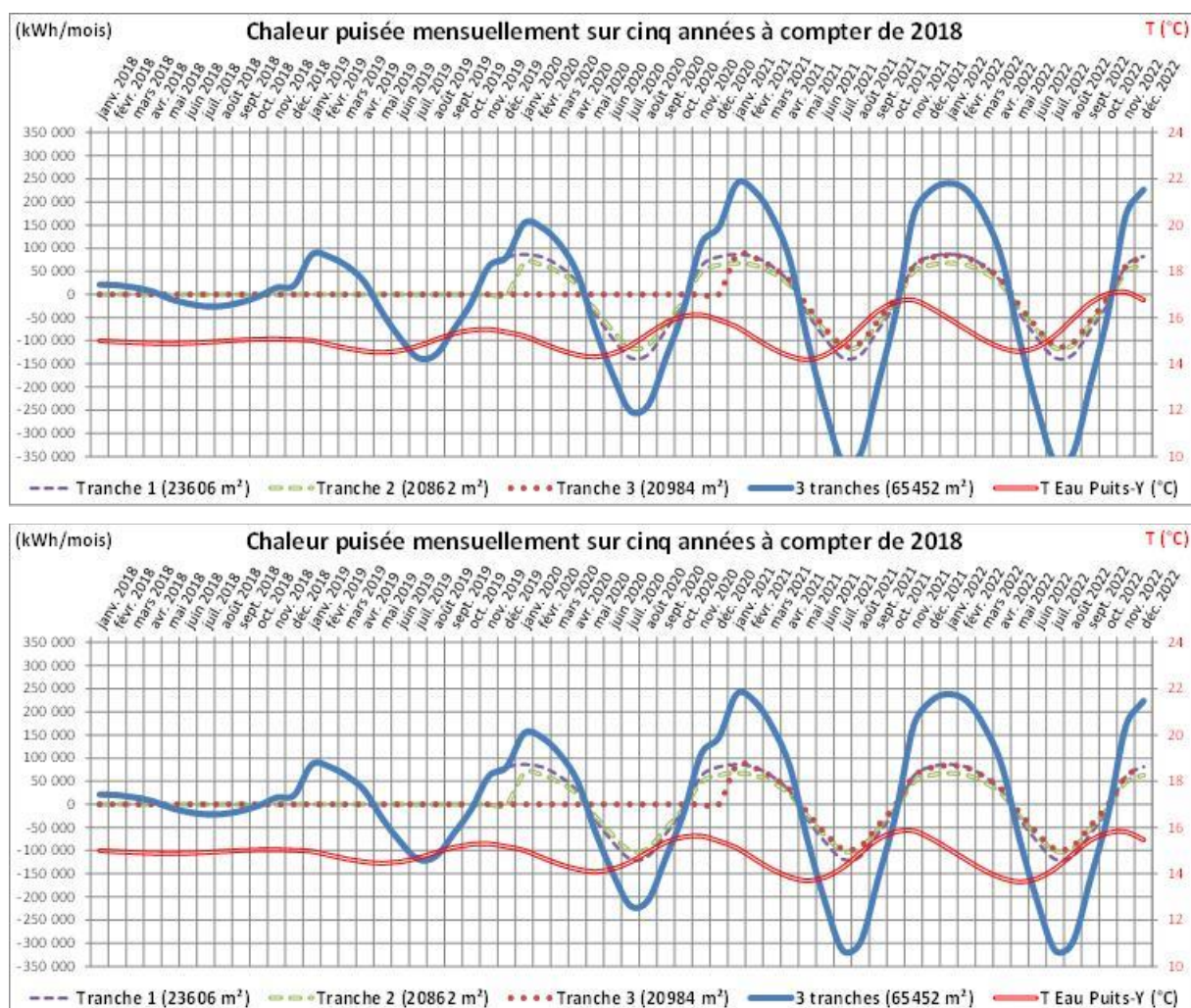


Figure 66 : Comparaison de la climatisation (en haut) et du rafraîchissement direct (en bas) pour la technique du champ de sondes

En comparant les graphiques ci-dessus, on constate que l'exploitation s'équilibre entre les puisages en période hivernale et les injections de chaleur en période estivale. Pour le champ de sondes pris en exemple ci-dessus, on peut estimer, selon le coefficient de sécurité imposé par le concepteur, le nombre des ouvrages à forer à moins de 200 sondes géothermiques (moins de 20 000 mètres forés) ; ce qui pourrait représenter un budget d'investissement estimé entre 1,4 M€ et 1,6 M€. A noter que ce relativement faible nombre de mètres forés rapporté aux surfaces raccordées vis-à-vis de ce qui est implanté pour le Campus AIRBUS à Blagnac (28 800 m forés, Figure 35), résulte de l'équilibrage entre les puisages hivernaux et les injections estivales, ce qui permet d'assurer la régénération thermique du sous-sol.

7.3. CAS DU CHAMP DE SONDES A HAUTE TEMPERATURE POUR 65 000 m²

Pour un champ de sondes à moins de 200 m de profondeur (profondeur à ne pas dépasser selon les critères de la minime importance), la température moyenne non perturbée resterait de l'ordre de 16 °C à 17 °C ; ce qui n'est donc pas un critère suffisant pour choisir des forages plus profonds dont le but serait d'obtenir des températures plus élevées.

D'ailleurs, la plupart des stockages en champs de sondes à relativement haute température privilégient les faibles profondeurs ; ce qui permet une meilleure maîtrise thermique et environnementale. On peut par exemple citer les opérations suivantes dont les températures de stockage atteignent ou dépassent 70 °C : Crailsheim en Allemagne (50 m de profondeur, 37 500 m³), Okotoks au Canada (37 m de profondeur, 34 000 m³) et Braedstrup au Danemark (47 m de profondeur, 19 000 m³)

Comme pour tous les stockages à haute température, un champ de sondes sera dimensionné prioritairement pour une utilisation en chauffage direct, c'est-à-dire pour délivrer une température minimale de 35 °C à 40 °C. On peut donc considérer que le ΔT peut atteindre 35 °C entre maxima estival et minima hivernal.

En première approche, on admettra qu'un volume de roche de 10 000 m³ représente un stock thermique de l'ordre de 64 MWh pour un ΔT de 10 °C. Dans le cas des 65 000 m² de la ZA Morandat, l'ordre de grandeur de l'énergie thermique pour le chauffage en usage direct et l'ECS est de l'ordre de 1,8 GWh. Aussi, en prenant un ΔT d'exploitation de l'ordre de 30 °C à 35 °C, le volume du stockage pourrait théoriquement rester inférieur à 100 000 m³ de roches, soit approximativement trois fois le volume installé à Crailsheim ou à Okotoks. Toutefois, d'autres critères sont à considérer, notamment les pertes thermiques qui interviennent de façon non négligeable dès lors que la température moyenne du stockage est significativement différente de la température non perturbée des roches.

Par ailleurs, pour produire de l'eau glacée avec des groupes à sorption, la température doit dépasser 60°C et, si possible, atteindre 85 °C à 90°C. Un stockage en champ de sondes doit donc, comme pour le stockage dans le Puits Y, être complété par d'autres sources en surface comme du solaire direct ou de l'énergie fatale afin de remonter le niveau de la température.

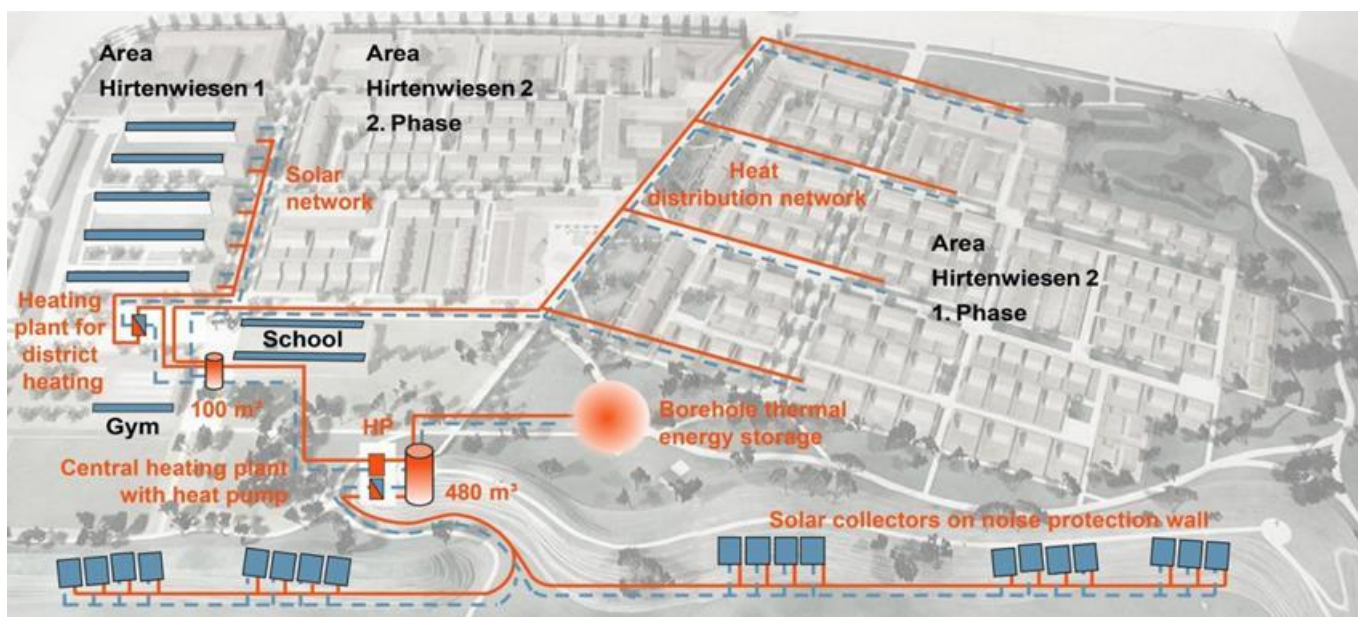


Figure 67 : Représentation de l'installation de Crailsheim recourant à un champ de sondes stockant l'énergie thermique de panneaux solaires

8. Phase 1 : Synthèse résumée

8.1. SOLUTION DE BASE : AMENAGEMENT A MINIMA DU PUITS Y

8.1.1. Puits Y : Technologies de référence ⇔ Stockage alterné et Boucle tempérée

Au moyen d'un réseau d'énergie en boucle tempérée, la technologie de référence distribue à des pompes à chaleur réparties le long du réseau alternativement une eau plutôt tiède en saison hivernale et une eau plutôt fraîche en saison estivale :

- La température de production recherchée dans le Puits Y en début de saison hivernale est de l'ordre de 25 °C à 30 °C. Le chauffage et l'ECS sont fournis à l'usager *via* des pompes à chaleur qui rejettent des frigories. La température dans le Puits Y baisse alors progressivement au fil de la saison hivernale.
- La température de production recherchée dans le Puits Y en début de saison estivale est de l'ordre de 10 °C à 15 °C. Si possible le rafraîchissement direct est exploité. La climatisation est fournie par des pompes à chaleur ; lesquelles rejettent de la chaleur. La température dans le Puits Y augmente progressivement au fil de la saison estivale.

Le Puits Y est ici considéré comme un stockage saisonnier, alternativement tiède et frais. Sa capacité de stockage thermique étant limitée, la température du stockage doit être gérée par anticipation. Le principe général est que l'énergie frigorifique stockée en saison hivernale doit être du même ordre de grandeur que l'énergie thermique stockée en saison estivale. A titre indicatif, sans aménagement particulier, l'énergie correspondant à un écart saisonnier de la température de 15 °C dans le Puits Y est de l'ordre de 1,3 GWh.

L'énergie pouvant être stockée dans le Puits Y, sans aménagement particulier de ce dernier, est du même ordre de grandeur que les besoins en chauffage et ECS de toute la ZA Morandat mais elle est inférieure aux rejets des climatisations. Toutefois, elle pourrait correspondre aux besoins en rafraîchissement direct si cette technologie était envisageable.

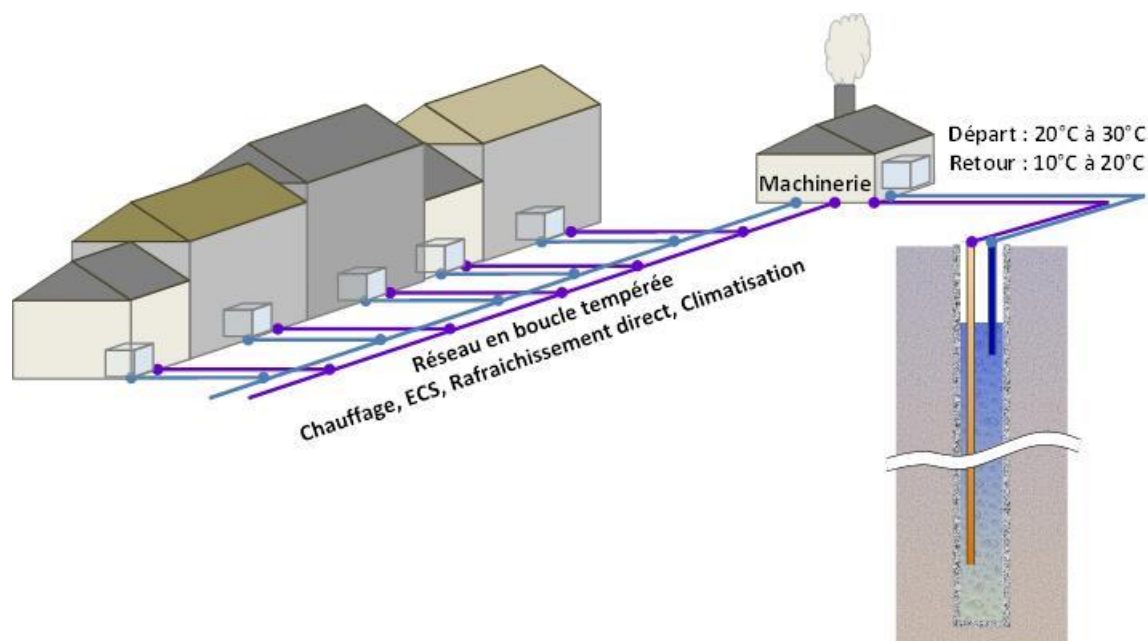


Figure 68 : Puits_Y ; Technologie de référence - Stockage alterné et Boucle tempérée

8.1.2. Puits Y : technologies alternative ⇔ Stockage chaud et Réseau de chaleur

Au moyen d'un réseau de chaleur, la technologie alternative distribue une eau constamment chaude résultant d'une combinaison entre la chaleur directement fournie par la source solaire et/ou fatale et celle extraite du Puits Y où est périodiquement stockée de la chaleur de la source solaire et/ou fatale afin de la rendre disponible en permanence :

- La température de production recherchée dans le Puits Y en fin de saison hivernale est, a minima, de l'ordre de 35 °C à 40 °C afin de permettre le chauffage direct, donc sans recourir à des pompes à chaleur.
- La température de production recherchée dans le Puits Y en début de saison estivale devrait être supérieure à 70°C, voire supérieure à 80°C, pour alimenter directement des groupes de climatisation à absorption mais un niveau de la température inférieur à 60°C pourrait représenter une contribution suffisante ; cela en fonction de la disponibilité des sources solaires et/ou fatales accessibles sur le secteur de la ZA Morandat.

Le Puits Y est ici considéré comme un stockage constamment maintenu en température à l'aide d'une source solaire et/ou fatale surabondante. Le stockage thermique pouvant être constamment régénéré, sa capacité thermique peut rester limitée. Sur le principe, l'écart de températures pouvant être typiquement exploité est de l'ordre de 15 °C à 25 °C et la température recherchée en saison estivale peut techniquement aller de 50 °C à 80 °C, les valeurs les plus faibles minimisant les pertes thermiques.

Exploitée de la sorte, l'énergie thermique pouvant être distribuée semble à même de couvrir tous les besoins thermiques de la ZA Morandat : chauffage, ECS et climatisation.

A titre indicatif, une première estimation indique qu'il faudrait de l'ordre de 4,5 GWh d'énergie thermique d'origine solaire, exploitée en direct ou indirectement via le Puits Y, pour satisfaire l'ensemble des besoins de la ZA Morandat, soit de l'ordre de 7 200 m² de panneaux plans ; ce qui représente moins de la moitié des toitures prévues sur la ZA Morandat.

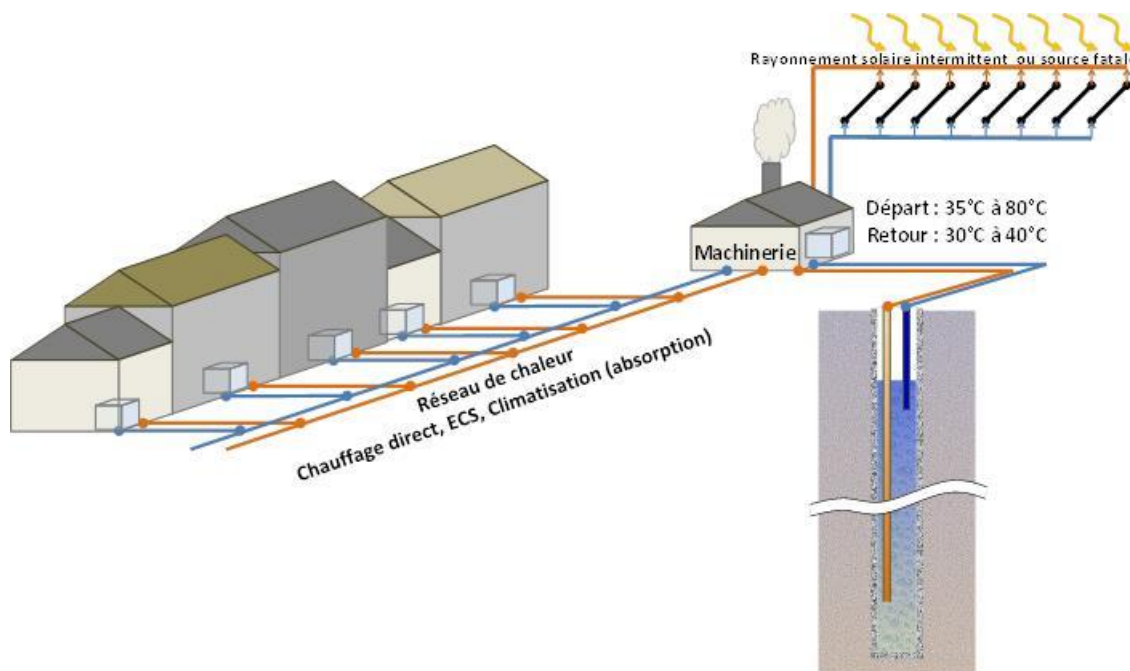


Figure 69 : Puits_Y ; Technologie alternative - Stockage chaud et Réseau de chaleur

8.1.3. Technologies d'échange de chaleur dans le Puits Y

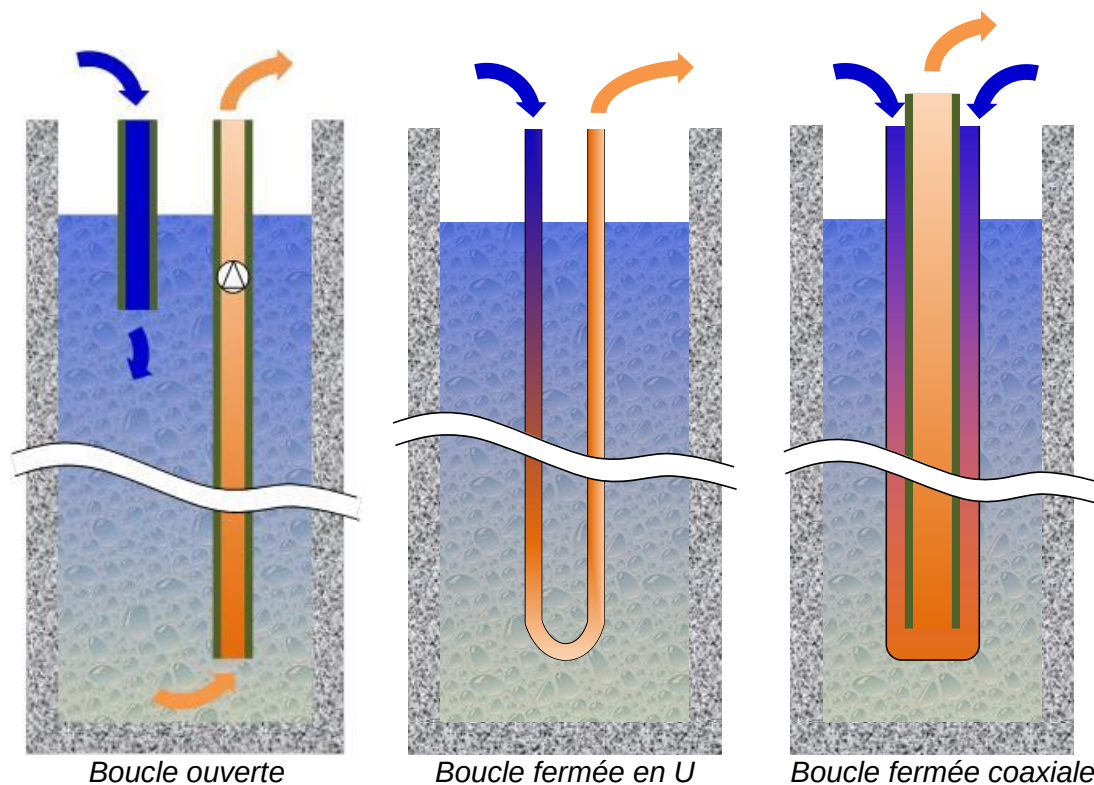


Figure 70 : Principes techniques pour échanger de la chaleur dans le Puits Y

Trois approches techniques sont disponibles, en acier comme en composite (meilleure tenue à la corrosion due à la qualité de l'eau), pour échanger de la chaleur avec l'eau contenue dans le Puits Y et, par conduction, avec les roches proches du puits :

- La technique dite en "boucle ouverte" fonctionne en pompant de l'eau dans une colonne plongeant à une profondeur donnée et en la réinjectant dans une autre colonne à une autre profondeur. La température de l'eau pompée doit correspondre au mode d'utilisation. Une pompe doit être immergée dans chaque dispositif constitué de deux colonnes. Un échangeur de chaleur est à installer en surface et de la maintenance est nécessaire. Par sécurité, il peut être décidé d'implanter *a minima* deux dispositifs ; chacun ayant la capacité d'assurer pratiquement la puissance thermique utile. Le coût estimatif par unité, selon le matériau, est de l'ordre de 300 k€ hors mise en place. Le coût d'une pompe immergée peut atteindre 100 k€ à 150 k€.
- Les techniques dites en "boucle fermée" fonctionnent en faisant circuler de l'eau dans un échangeur de chaleur envoyé sur une grande hauteur dans le Puits Y :
 - La technique en U est la plus simple à mettre en place car les tubes de petit diamètre sont livrés en touret. Une des deux branches peut être gainée d'un isolant thermique afin de favoriser l'obtention de la température souhaitée selon le sens de circulation du fluide. La puissance thermique par unité ne dépasse pas 50 KW sur la hauteur du Puits Y. Il faudrait une vingtaine d'unités. Les pompes (circulateurs) sont en surface. Une unité représente de l'ordre de 40 k€ à 100 k€ (estimation car à réaliser sur mesure).
 - La technique coaxiale est thermiquement plus efficace que la technique en U et sa puissance thermique peut dépasser 50 KW, voir même 100 kW sur la hauteur du Puits Y. Il faudrait entre 5 et 10 unités. Les pompes (circulateurs) sont en surface.

Le coût d'une unité mise en place peut représenter de l'ordre de 100 k€ à 200 k€ (estimation car à réaliser sur mesure).

8.1.4. Pour information : Variantes d'aménagement du Puits Y

Dans le but d'augmenter la capacité thermique du Puits Y telle que constatée pour la configuration A) dite de base, c'est à dire sans aménagement, il paraît possible d'aménager deux segments distincts des points de vue hydraulique et/ou thermique, du fait de l'étanchéité du cuvelage. Quatre options sont envisageables en notant toutefois que l'équipement le long des parois du Puits Y n'a pas été démantelé et que cela pourrait poser problème.

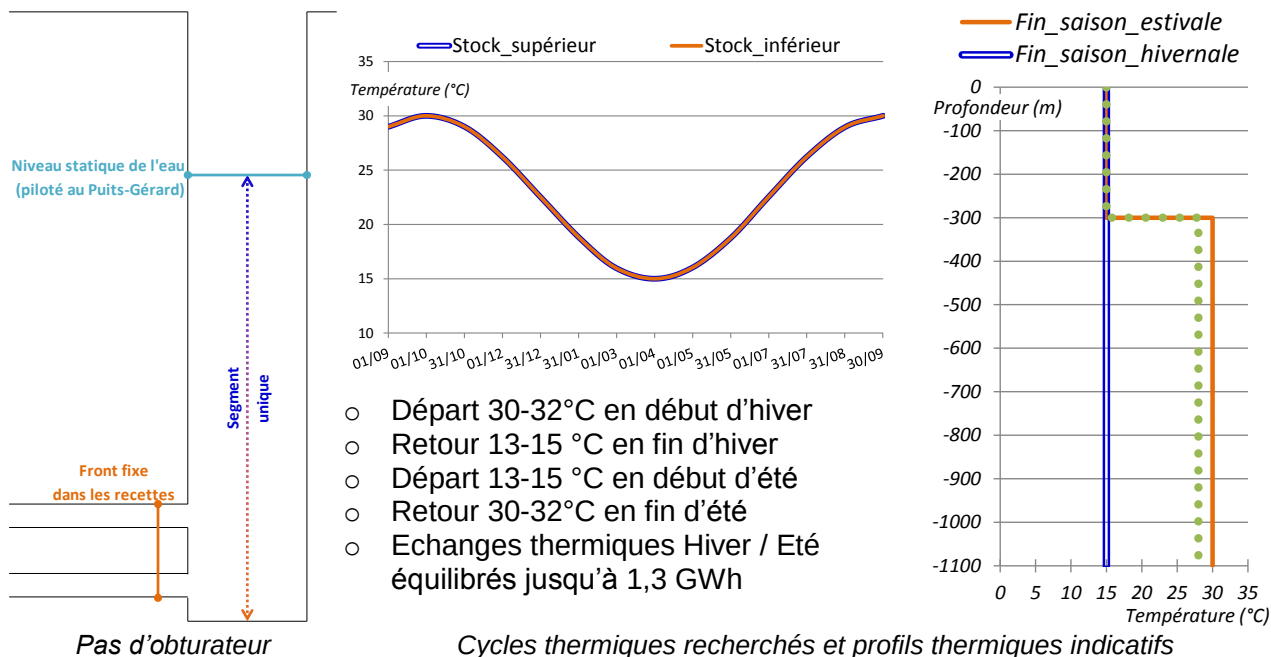


Figure 71 : Configuration A) – Configuration de base sans aménagement dans le Puits Y

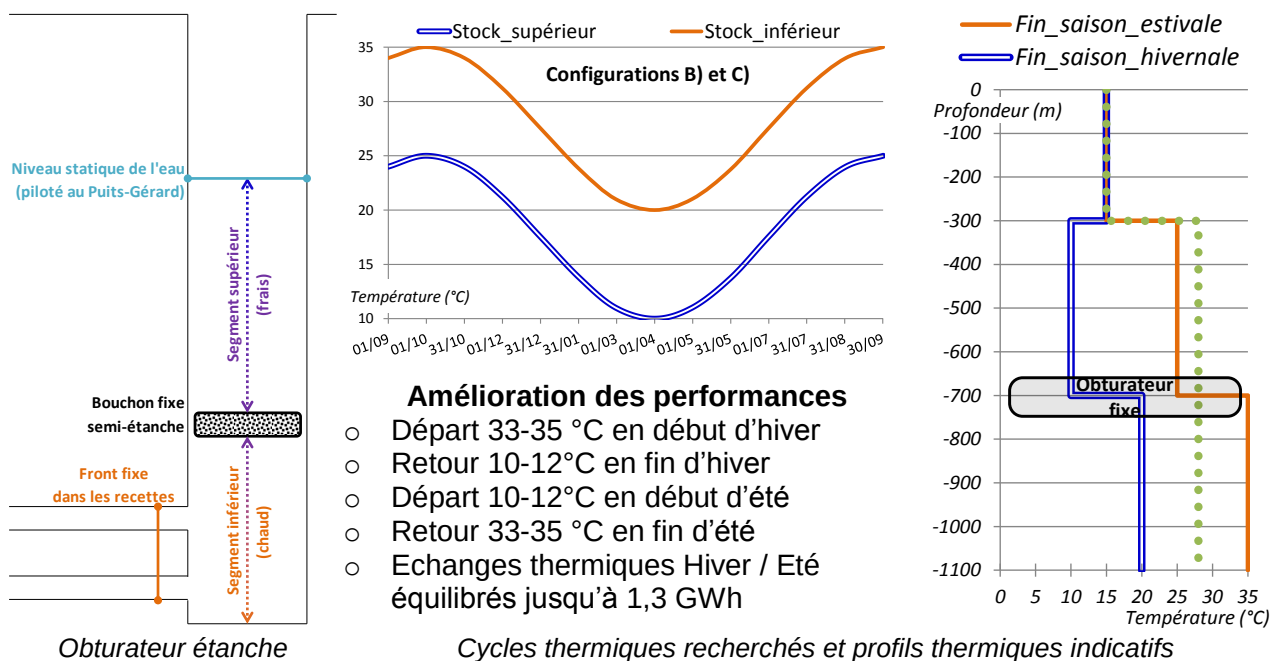


Figure 72 : Configuration B) – Configuration avec obturateur semi étanche fixe dans le Puits Y

Les configurations B), C) et D) proposent une graduation dans les aménagements qui restent théoriques du fait des difficultés techniques pour la mise en place et l'exploitation. En outre, toutes ces configurations mobilisent l'espace central du Puits Y ; ce qui y interdit toute autre utilisation, y compris la surveillance.

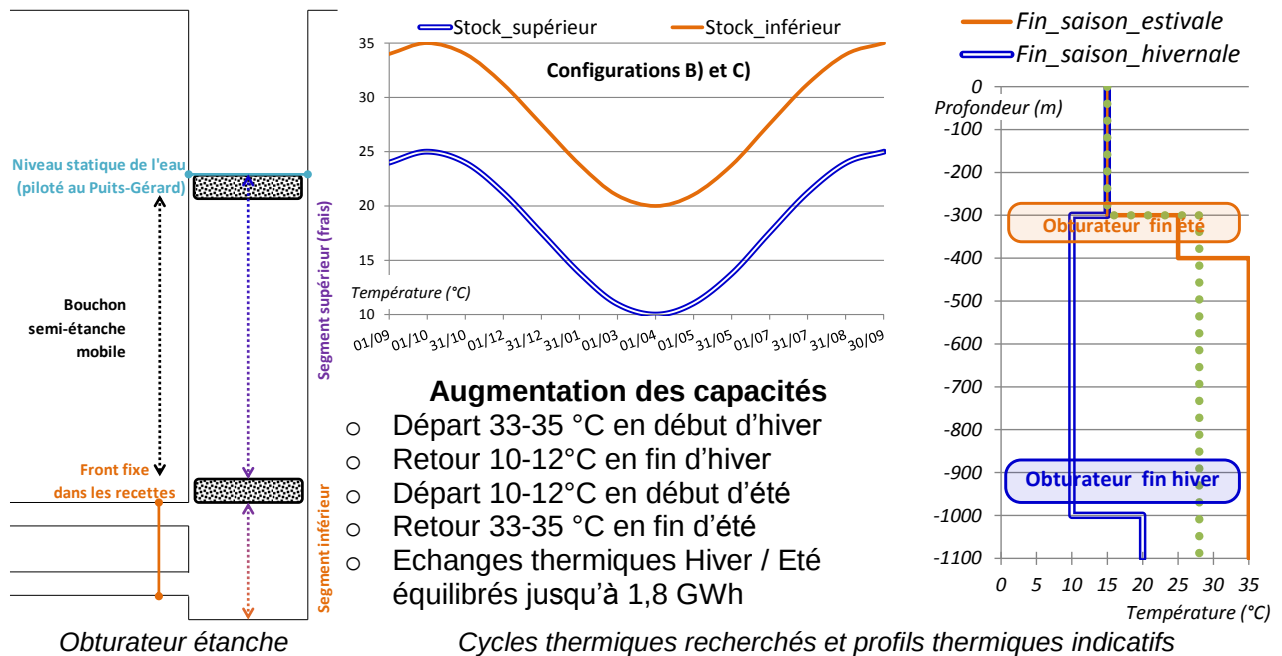


Figure 73 : Configuration C) – Configuration avec obturateur semi étanche mobile dans le Puits Y

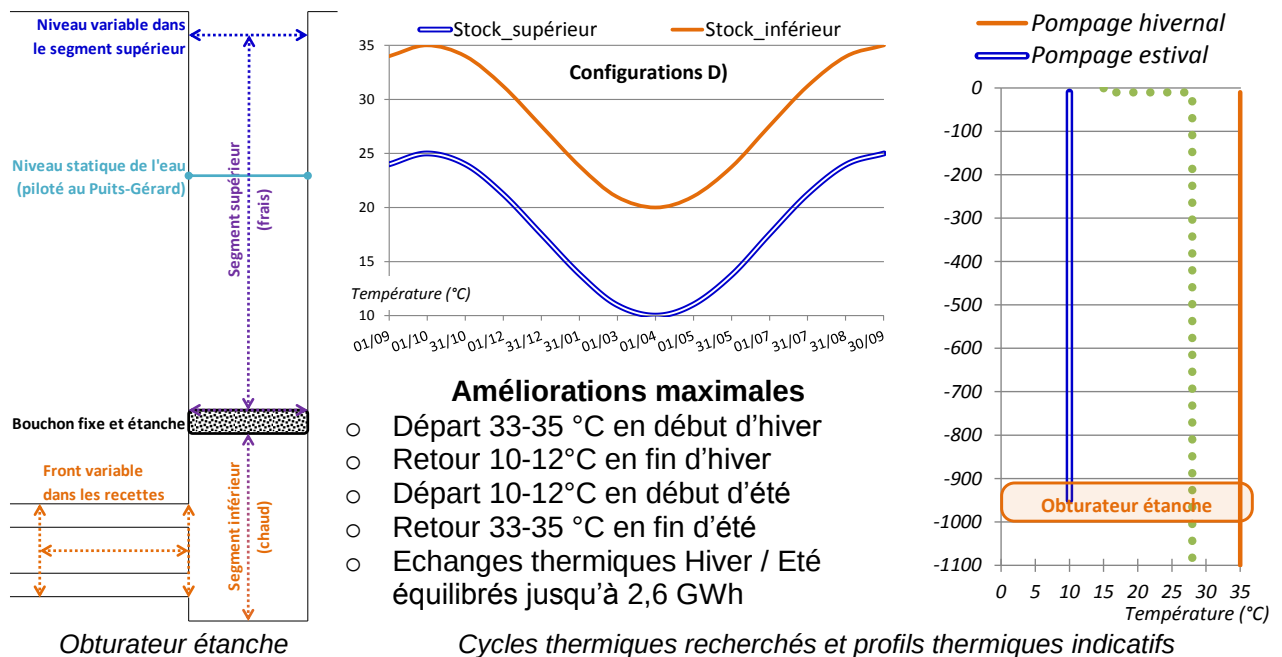


Figure 74 : Configuration D) – Configuration avec obturateur étanche fixe dans le Puits Y

8.2. SOLUTION DE REPLI : CHAMP DE SONDES GEOTHERMIQUES (SGV)

Le stockage dans le Puits Y représente de l'ordre de 60 000 m³ d'eau auxquels il convient d'adjoindre un volume équivalent de roches, d'une forme annulaire, dans le voisinage immédiat du Puits Y, les roches ayant une capacité thermique significativement moindre que celle de l'eau. L'ensemble représente une capacité thermique de l'ordre 1,3 GWh pour 15 °C d'écart de température.

Vis-à-vis du stockage dans le Puits Y, un stockage en champ de sondes géothermiques verticales (SGV) pourrait typiquement représenter une capacité thermique très supérieure à celle accessible dans le Puits Y du fait de volumes de roches thermiquement impactées très importants pouvant atteindre un million de mètres cube.

A titre indicatif, un échange de chaleur de 5 GWh dans un grand champ de 200 sondes peut n'induire qu'un ΔT moyen de l'ordre de 10 °C alors que, dans le Puits Y, un échange de 1,3 GWh induirait un ΔT de 15 °C.

Cependant, les phénomènes thermiques par diffusion sont plus lents que ceux par convection dans le Puits Y et l'investissement est bien plus élevé. Par contre, la durée de vie sans maintenance des équipements est supérieure à 50 ans ; ce qui ne peut s'envisager dans le Puits Y qu'à condition de l'aménager avec des équipements résistants à la corrosion.

8.2.1. Champ de sondes géothermiques : Technologies de référence et alternative

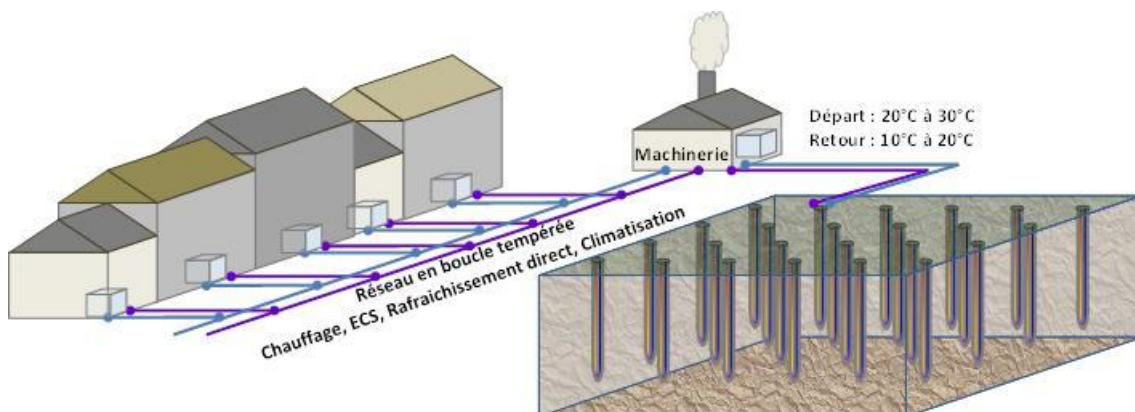


Figure 75 : Champ de sondes ; Technologie de référence - Stockage alterné et boucle tempérée

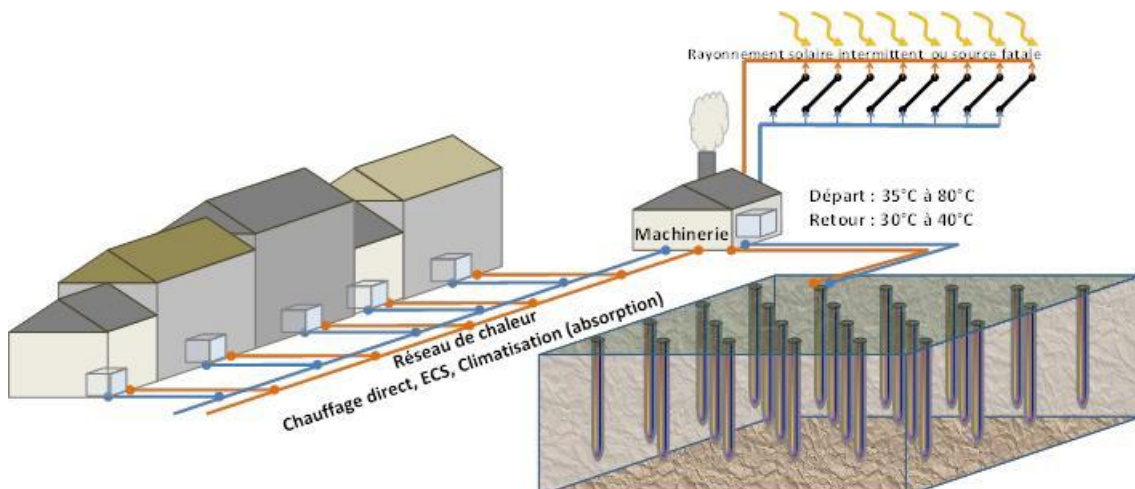


Figure 76 : Champ de sondes ; Technologie alternative - Stockage chaud et réseau de chaleur

Technologie de référence : Stockage alterné et Boucle tempérée

Au moyen d'un réseau d'énergie en boucle tempérée, la technologie de référence distribue alternativement une eau plutôt tiède en saison hivernale et une eau plutôt fraîche en saison estivale :

- Avec le champ de sondes, la température de production recherchée en début de saison hivernale est typiquement de l'ordre de 15 °C. Le chauffage et l'ECS sont fournis par des pompes à chaleur ; lesquelles rejettent de l'énergie frigorifique. La température dans le champ baisse progressivement au fil de la saison hivernale.
- Avec le champ de sondes, la température de production recherchée en début de saison estivale peut descendre sous 10 °C, voire sous 5 °C. Le rafraîchissement direct est exploitable pendant une assez longue période et la climatisation est fournie par des pompes à chaleur. Sous l'effet des rejets de chaleur, la température dans le champ de sondes augmente progressivement au fil de la saison estivale.

Un champ de sondes géothermiques est donc considéré comme un stockage saisonnier, alternativement tiède et frais. Sa capacité de stockage thermique est importante mais doit être gérée par anticipation. Le principe est que l'énergie frigorifique stockée en saison hivernale doit être légèrement supérieure à la chaleur stockée en saison estivale. A titre indicatif, l'énergie pour l'ensemble de la ZA Morandat pourrait être gérée avec un écart saisonnier de la température moyenne de 10 °C pour les roches impactées par le champ de sondes.

Néanmoins, cela ne paraît envisageable qu'à condition de procéder avec une part prépondérante de rafraîchissement direct vis-à-vis de la climatisation, au risque de déséquilibrer les injections estivales de chaleur au détriment des usages hivernaux d'énergie.

Technologie alternative : Stockage chaud et réseau de chaleur

Au moyen d'un réseau de chaleur, la technologie alternative distribue une eau chaude résultant d'une combinaison entre la chaleur directement fournie par la source solaire et/ou fatale et celle extraite du champ de sondes où est périodiquement stockée de la chaleur issue de la source solaire et/ou fatale afin de la rendre disponible en permanence :

- La température de production recherchée en fin de saison hivernale est *a minima* de l'ordre de 35 °C à 40 °C afin de permettre le chauffage direct sans recourir à des pompes à chaleur.
- La température de production recherchée durant la saison estivale est si possible supérieure à 70 °C, voire atteindre 80 °C, afin de contribuer efficacement à la climatisation par des groupes à absorption.

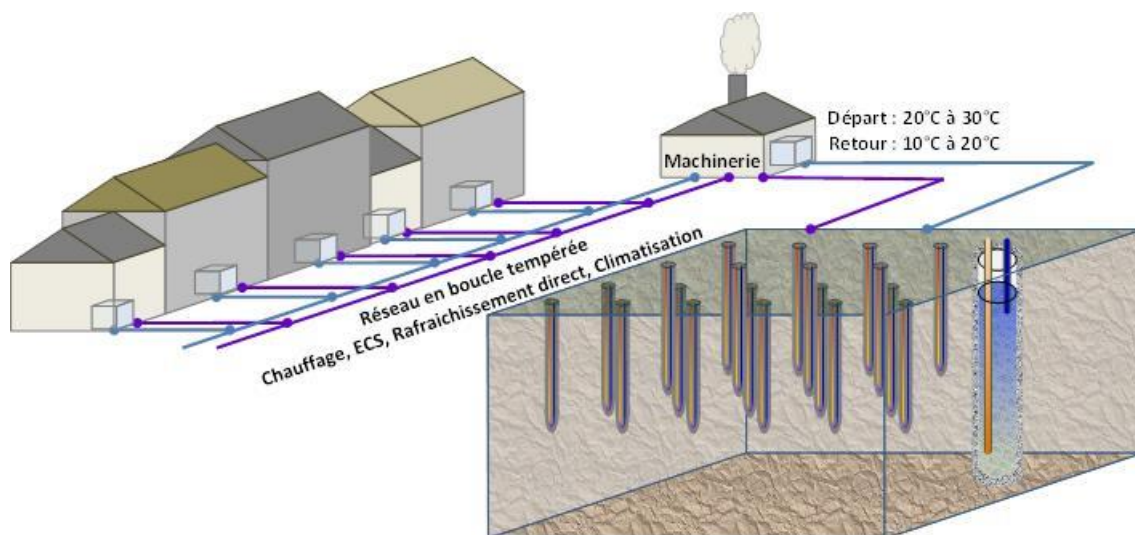
Le champ de sondes est donc considéré comme un stockage maintenu en température à l'aide d'une source solaire et/ou fatale surabondante. Le stockage thermique pouvant être constamment régénéré, sa capacité thermique peut rester assez limitée. Sur le principe, l'écart de la température exploitée peut n'être que de l'ordre de 15 °C à 25 °C alors que la température recherchée durant la saison estivale peut atteindre 75 °C à 80°C.

Exploitée de la sorte, l'énergie thermique distribuée semble à même de couvrir tous les besoins thermique de la ZA Morandat : chauffage, ECS et climatisation. Une première approximation indique qu'il faudrait de l'ordre de 4,5 GWh d'énergie thermique d'origine solaire (7 200 m²) ou fatale, exploitée en direct ou via le champ de sondes, pour satisfaire l'ensemble des besoins de la ZA Morandat.

8.3. RESEAUX DE DISTRIBUTION DE L'ENERGIE THERMIQUE

8.3.1. Réseau de distribution de référence en boucle tempérée

Dans le cadre de l'étude sur la ZA Morandat, l'architecture de réseau en boucle tempérée de type "2 tubes" représente la solution de référence. Le chauffage fait obligatoirement appel à des pompes à chaleur alors que le rafraîchissement des locaux combine le rafraîchissement direct et/ou la climatisation.



Solution de référence exploitant le Puits Y

- En début de saison hivernale, on pourra considérer que la température de départ réseau sera typiquement de l'ordre de 28°C à 30 °C alors que, avec un ΔT indicatif de l'ordre de 15 °C entre le départ réseau et le retour réseau, la température de retour réseau attendue devrait s'établir vers 12°C à 13°C. Ce niveau de la température correspond à la température de réinjection dans le Puits Y.
- En début de saison estivale, la température de départ réseau est relativement basse dans le Puits Y après une saison de chauffage durant laquelle les puisages de chaleur équivalent à la formation d'un stock frais/froid typiquement vers 15 °C. En fin de saison estivale, la réinjection de la chaleur extraite des locaux remonte la température du Puits Y vers la valeur initiale de 28°C à 30 °C, ou légèrement plus.

La performance environnementale de cette solution résulte de la bonne efficacité des machineries thermodynamiques du fait des températures favorables de la source.

Solutions de repli exploitant un champ de sondes géothermiques

- En début de saison hivernale, la température de départ réseau est typiquement de l'ordre de 20 °C à 22°C et baisse progressivement en cours de saison. Avec un ΔT de l'ordre de 10 °C entre le départ réseau et le retour réseau, la température de retour réseau s'abaisse vers 7°C à 8°C en fin de saison, ce qui génère un stock thermique à moins de 10 °C dans le volume de roche du champ de sondes
- En début de saison estivale, la température de départ réseau relativement basse permet une large utilisation du rafraîchissement direct ; le recours à la climatisation pouvant être évité dans la plupart des cas. En fin de saison, la température retrouve son niveau initial.

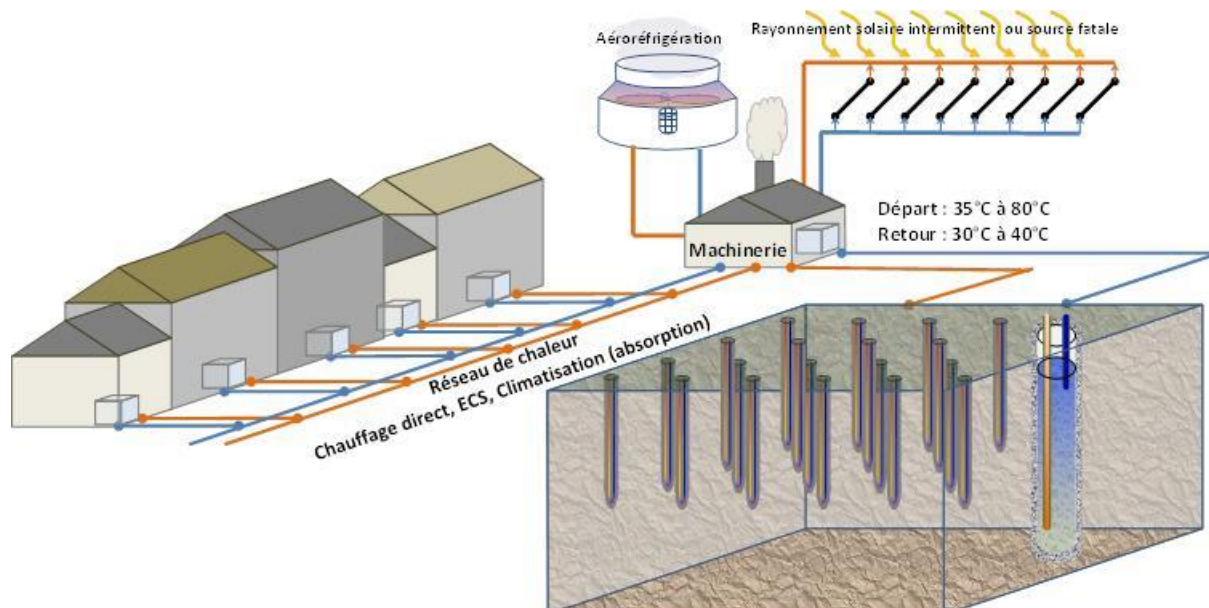
La performance environnementale provient du large usage du rafraîchissement direct.

8.3.2. Distribution alternative en réseau de chaleur

Solutions de référence exploitant le Puits Y et Solution de repli exploitant le champ de sondes géothermiques :

Dans le cadre de l'étude sur la ZA Morandat, la distribution en réseau de chaleur de type "2 tubes" convient également à la solution de repli malgré la complexité accrue impliquant de équipements supplémentaires de captage d'énergie solaire et/ou fatale. Par principe, le stockage géothermique rend constamment disponible la source thermique intermittente, solaire et/ou fatale. Ci-dessous, n'est décrit que le cas de la source solaire qui est répliquable en PACA.

Le chauffage se fait en usage direct alors que le rafraîchissement des locaux provient préférentiellement de groupes à sorption qui fonctionnent à partir de l'énergie thermique et non pas électrique mais nécessitent usuellement une aéroréfrigération.



- En début de saison hivernale, selon la répartition des ressources solaires, la température de départ réseau sera de l'ordre de 50 °C à 70°C. L'énergie solaire devient progressivement insuffisante et la température dans le stock souterrain baisse progressivement vers 40 °C à 45 °C au cœur de l'hiver puis remonte progressivement au cours du printemps.
- En début de saison estivale, la température de départ réseau permet le pilotage thermique des groupes à absorption, c'est-à-dire sans compresseur fonctionnant à l'électricité. Le cas échéant, l'appoint en température peut provenir de sources solaires. L'excédent solaire est réinjecté et régénère progressivement le stock thermique à 50 °C ou plus en fin de saison estivale ; une température importante n'étant pas nécessairement recherchée.

La performance environnementale de ce mode de distribution résulte de l'usage direct pour le chauffage et de l'usage de groupes à sorption pour la climatisation ; ce qui induit des consommations réduites en électricité, uniquement pour la circulation et les aérocondenseurs.

Le dimensionnement du stock souterrain (Puits Y ou champ de sondes) résulte de la disponibilité de la source solaire et/ou fatale. En tout état de cause, l'usage direct de la source solaire et/ou fatale est privilégié tant pour les besoins en chauffage que pour ceux en climatisation ; ce qui conduit à une sollicitation du stock souterrain modérée au regard de la technologie de référence distribuant l'énergie thermique en boucle tempérée. A noter que le ΔT d'exploitation du stockage peut être plus accru pour cette distribution alternative.

8.4. FICHES DE PRESENTATION DES 7 OPTIONS POSSIBLES

Les options techniques envisageables pour satisfaire les besoins thermiques de la ZA Morandat ont été réparties en 7 options :

- 4 options exploitent le Puits Y
- 3 options exploitent la solution de repli sur champ(s) de sondes géothermiques

Chacune de ces options fait ci-dessous l'objet d'une courte fiche (1 page) ; étant entendu que toutes ces options sont brièvement examinées au regard des besoins thermiques de l'ensemble de la ZA Morandat, à savoir 65 500 m² à l'issue des tranches de construction et de rénovation.

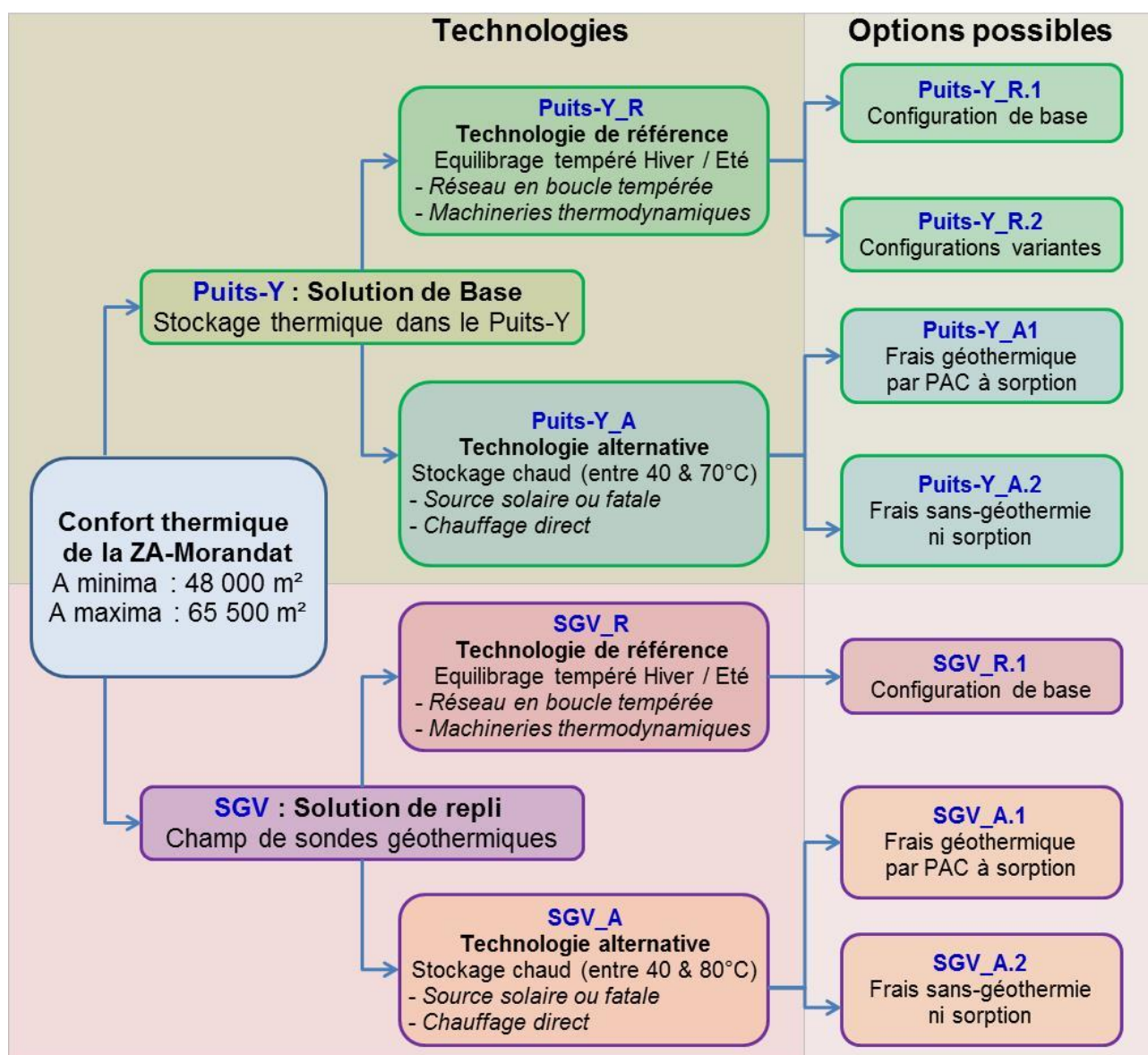
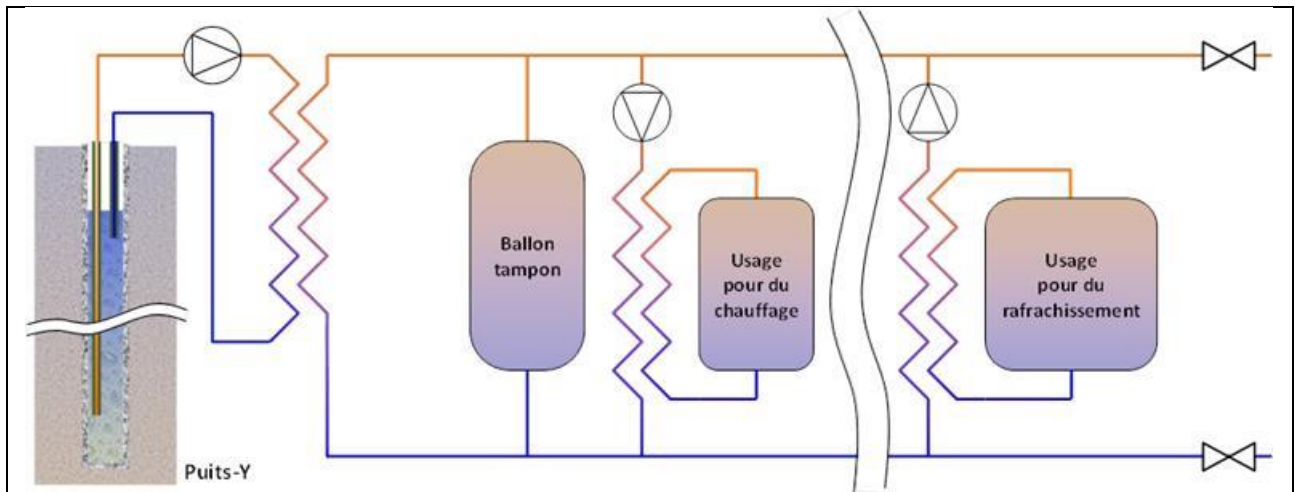
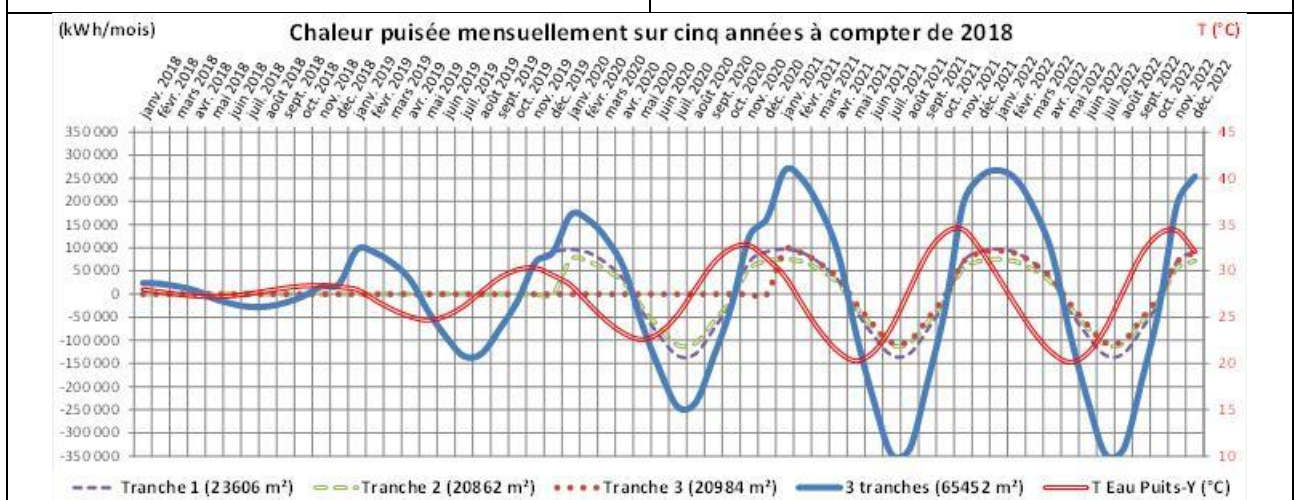


Figure 77 : Schéma logique des options technologiques identifiées par l'étude

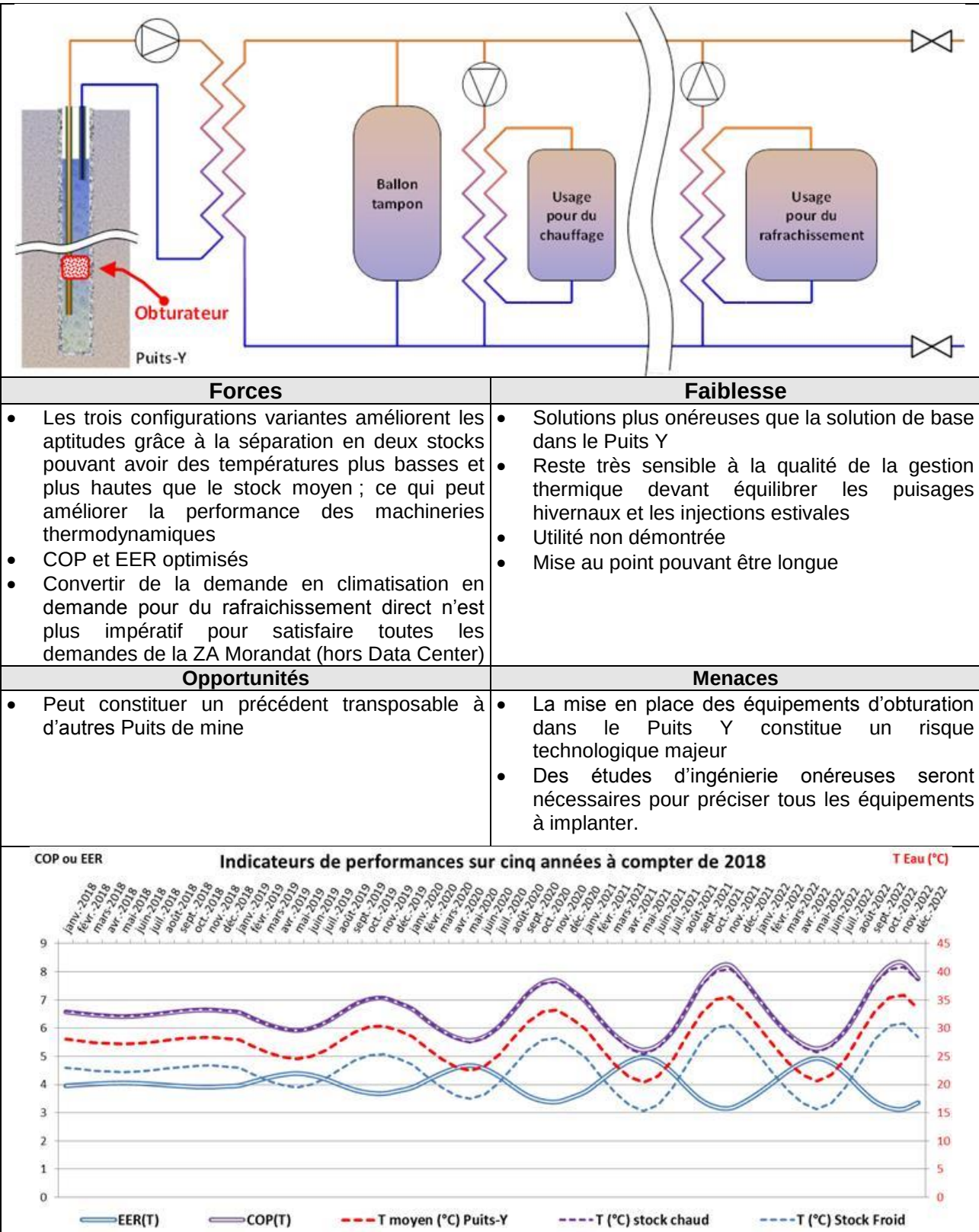
8.4.1. Puits Y_R.1 : Configuration de base dans le Puits Y



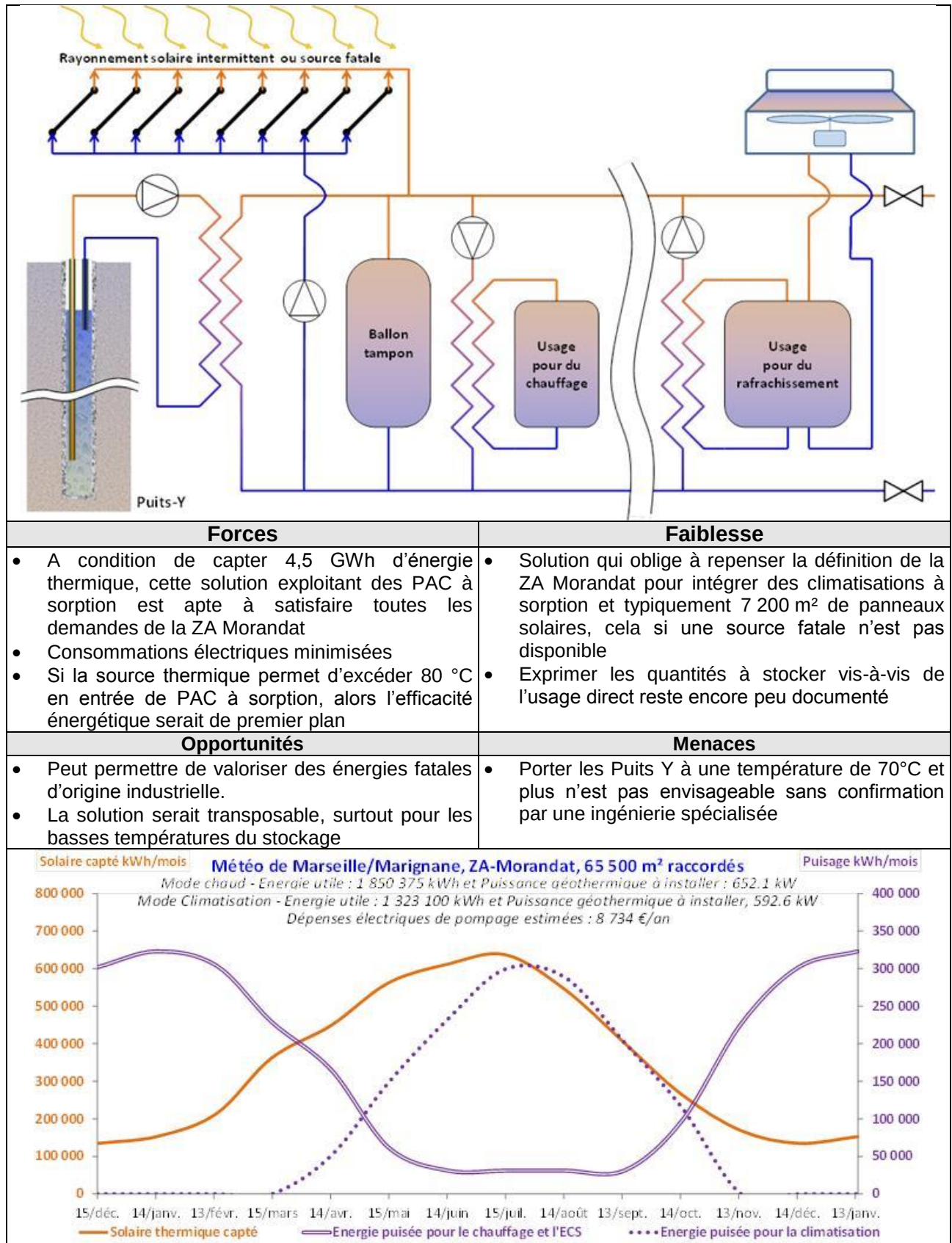
Forces	Faiblesse
• Solution la moins onéreuse en termes d'aménagement du Puits Y car il n'est pas à prévoir de moyen de contrôle de la convection thermique dans le puits. • COP et EER favorables • A condition de convertir une part de la demande en climatisation en demande pour du rafraîchissement direct, cette solution de base peut satisfaire toute la ZA Morandat	• Solution peu propice aux usages directs, ni en chauffage, ni en rafraîchissement • Ne peut pas satisfaire tous les besoins affichés en climatisation • Très sensible à la qualité de la gestion thermique devant équilibrer les puisages hivernaux et les injections estivales
Opportunités	Menaces
• Préserve l'espace central dans le Puits Y pour de la surveillance ou pour d'autres aménagements énergétiques (stockage gravitaire par exemple) • Compatible avec les équipements du puits en "boucle ouverte" et "boucle fermée", éventuellement en combinaison • Peut constituer un précédent transposable à d'autres Puits de mine dits "aveugle"	• La forte sensibilité à l'obligation d'équilibrage été/hiver rend la technologie assez peu transposable • Le niveau de l'eau et la mise en place des équipements dans le Puits Y peuvent représenter un risque économique • Des études d'ingénierie seront nécessaires pour préciser les équipements d'échange de chaleur à implanter ; notamment au regard de la maîtrise de la convection



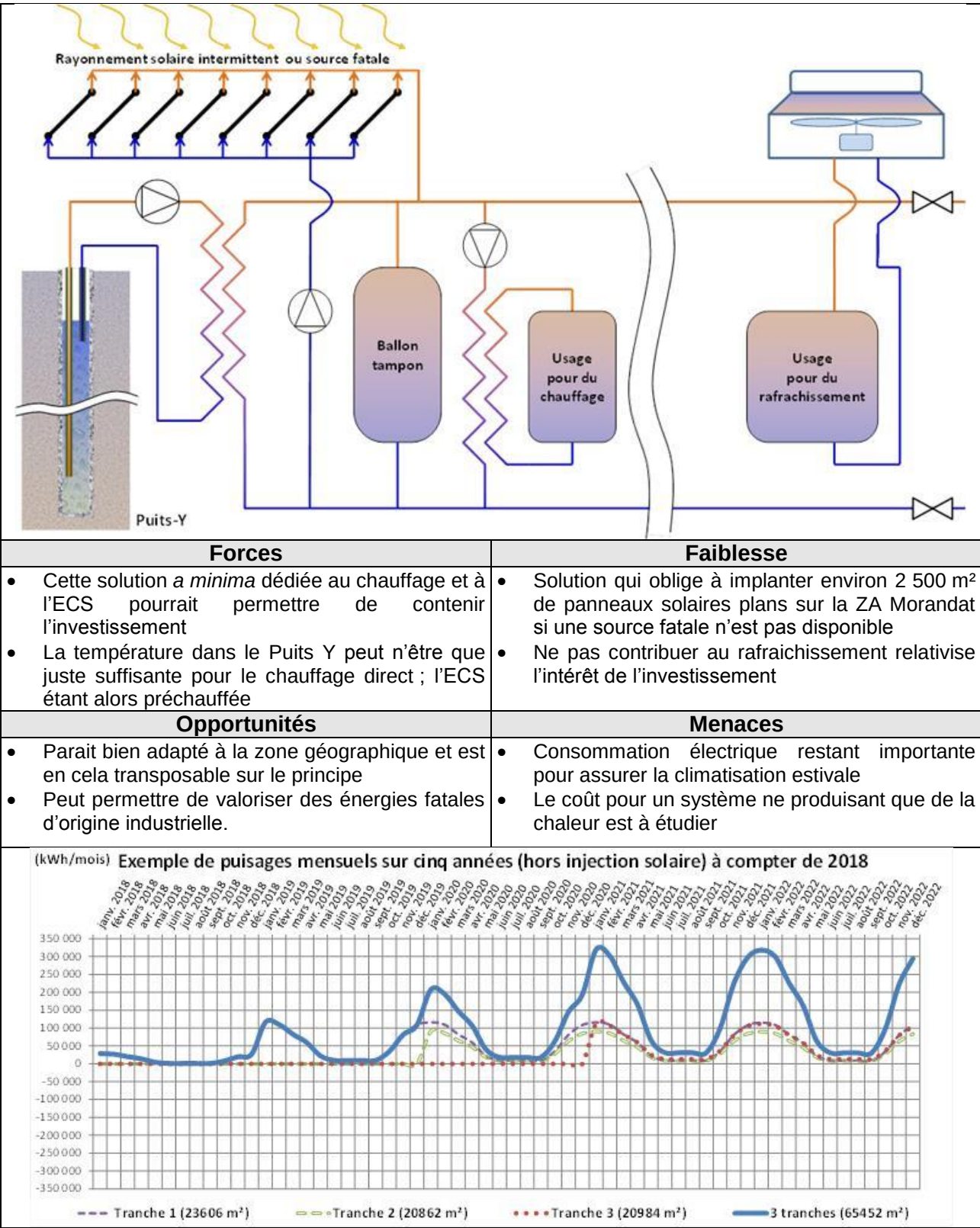
8.4.2. Puits Y_R.2 : Configurations variantes dans le Puits Y



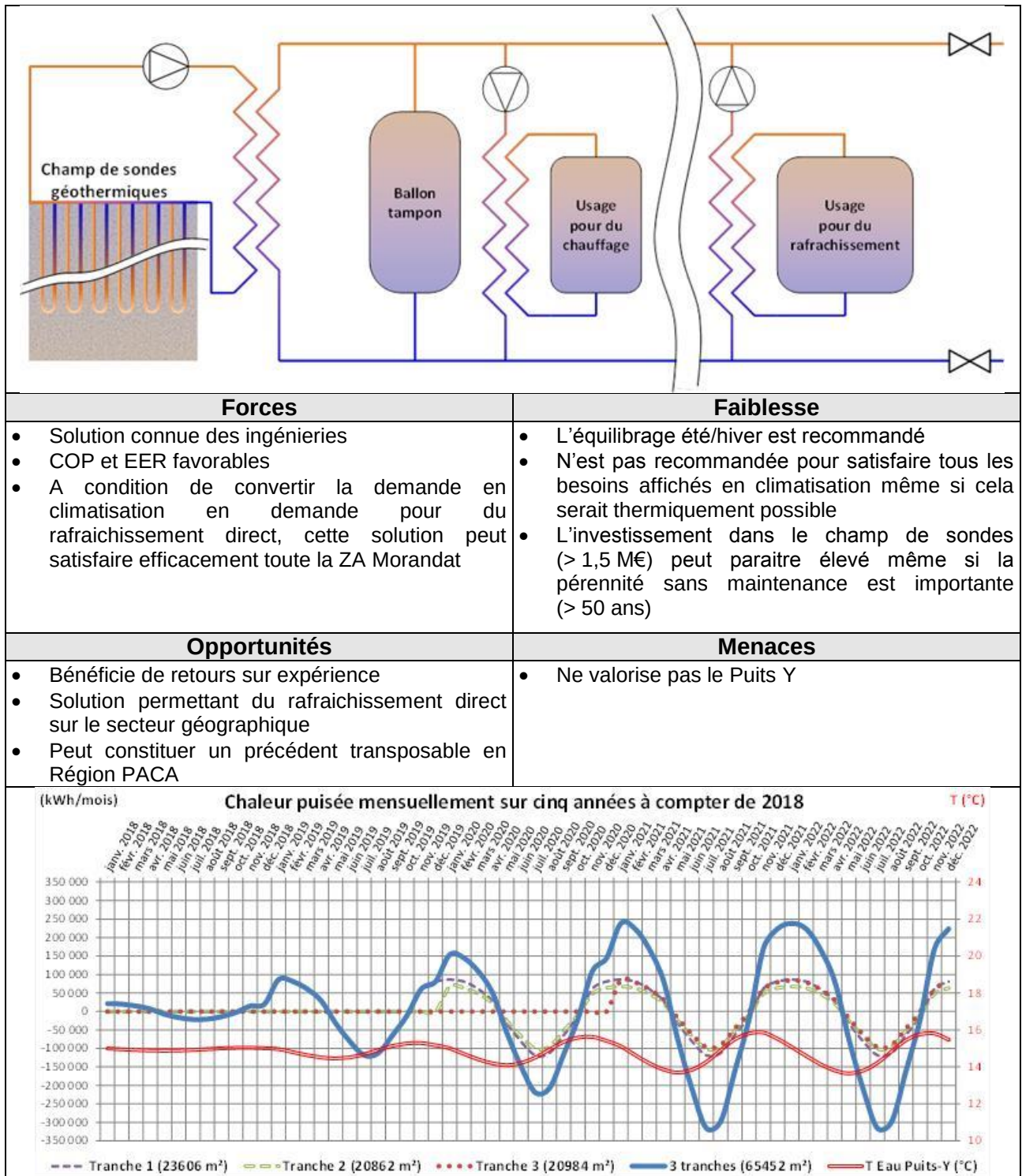
8.4.3. Puits Y_A.1 : Configuration alternative avec frais par absorption



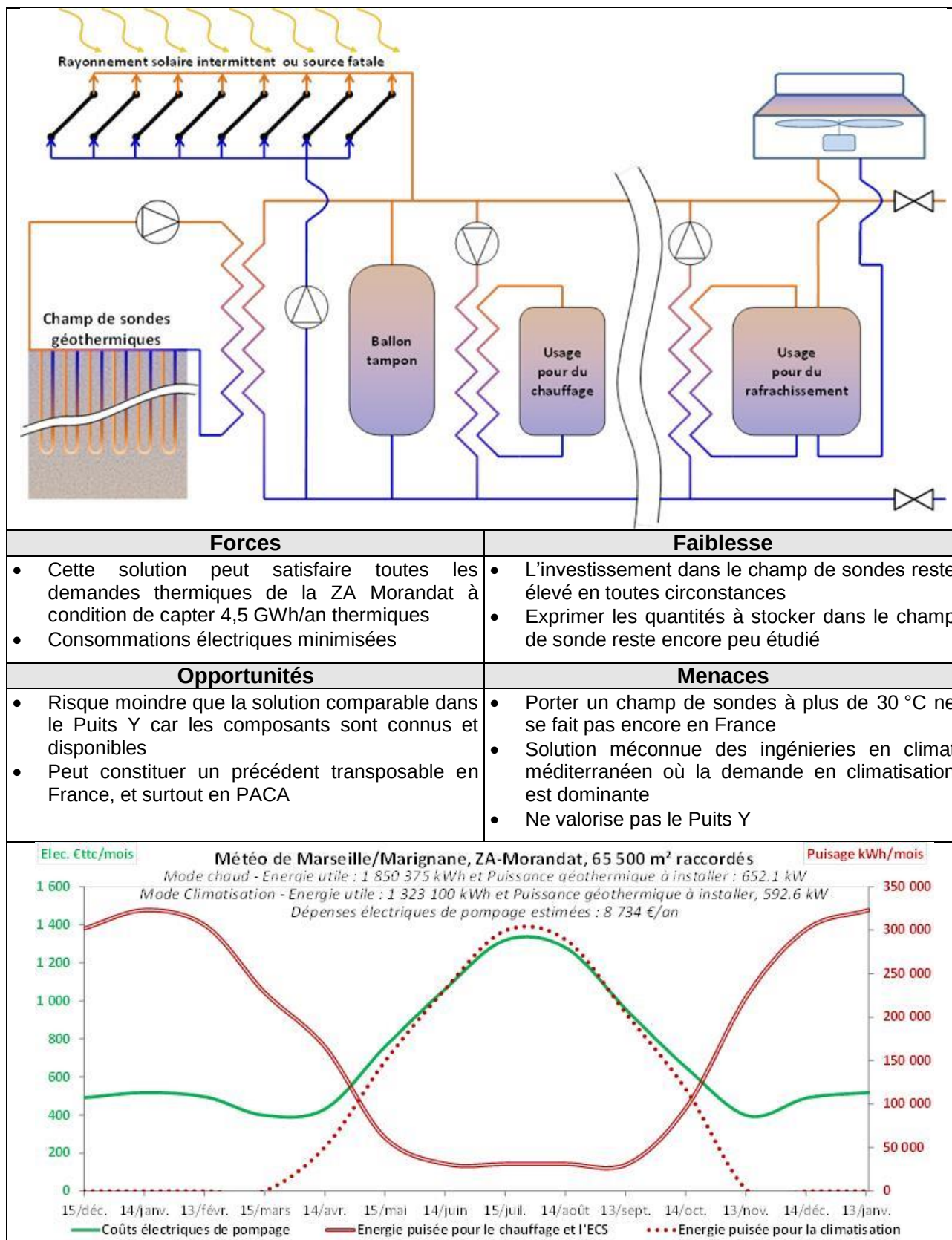
8.4.4. Puits Y_A.2 : Configuration alternative et frais sans géothermie ni sorption



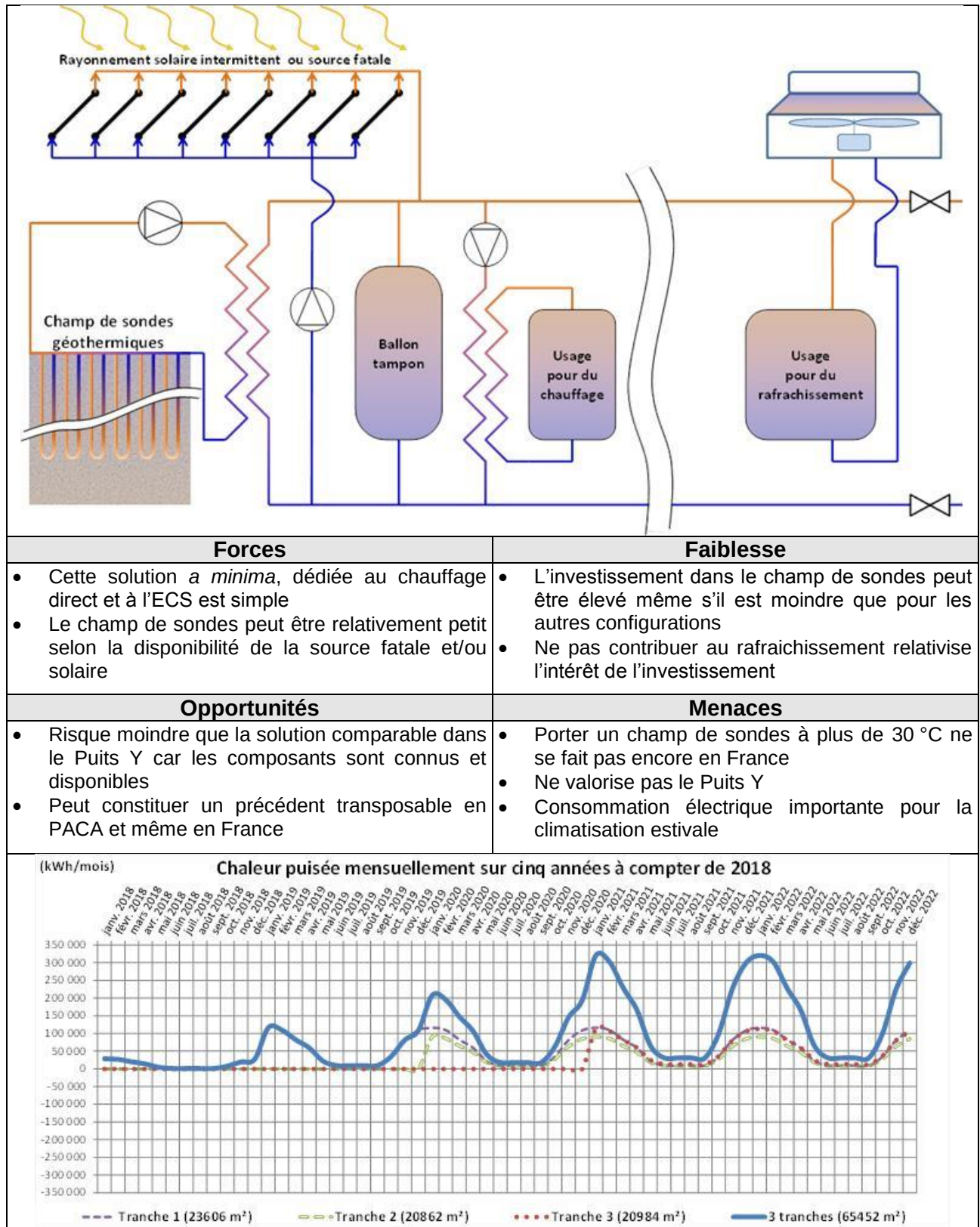
8.4.5. SGV_R.1 : Repli de base en champ de sondes géothermiques



8.4.6. SGV_A.1 : Repli alternatif avec rafraîchissement par sorption



8.4.7. SGV_A.2 : Repli alternatif et rafraîchissement sans géothermie ni sorption



9. Phase 2 : Approfondissement de trois scénarios

9.1. NOTE INTRODUCTIVE

La seconde Phase de l'étude fait suite au Comité de Pilotage du 12 janvier 2016 qui a sélectionné trois scénarios à approfondir, dont deux s'appliquent au Puits Y. Pour ces trois scénarios, l'approfondissement établit les bilans énergétiques du fonctionnement et intègre une estimation sommaire des investissements, ce qui n'était pas programmé dans la mission confiée au BRGM. Une surface de planchers neufs de 65 500 m² est prise en considération, devant comporter, à terme, 8 000 m² de locaux rénovés. Ces aménagements de la ZA Morandat, essentiellement dédiés à des activités tertiaires et économiques, sont prévus en trois tranches entre 2018 et 2021.

Il est d'abord rappelé que le Puits Y est un puits de mine dit "aveugle", qui est à considérer comme étant un réservoir d'eau souterrain d'une capacité thermique représentée par 63 000 m³ d'eau et les roches proches du puits. Sa température naturelle serait actuellement inférieure à 30 °C. Sa localisation au cœur de l'aménagement prévu de la ZA Morandat justifie que soient examinées les possibilités d'intégration du Puits Y dans le système énergétique.

Dans une première étape, avaient été présentées sept options techniquement envisageables : quatre options exploitant le Puits Y et trois options recourant à un repli sur solutions géothermiques. Parmi ces sept options, le Comité de Pilotage du 12 janvier 2016 a sélectionné trois scénarios devant être approfondis, à savoir deux scénarios exploitant le Puits Y et un troisième scénario géothermique pour représenter une référence économique (Figure 78).

Synthétiquement, ces trois scénarios se définissent comme suit :

1. **Scénario 1** - Solution de base visant l'exploitation du Puits Y à une température maintenue typiquement inférieure sous 30 °C afin de satisfaire la demande thermique en chauffage, ECS et rafraîchissement de la ZA Morandat selon la technique de distribution en réseau dit en "boucle tempérée" recourant à des pompes à chaleur pour le chauffage comme pour le rafraîchissement. Ce scénario se caractérise par une alternance saisonnière des énergies puisées puis injectées dans le Puits Y. Pour être pérenne, ce système impose que les quantités d'énergie puisées dans le Puits Y pour le chauffage et pour l'ECS (eau chaude sanitaire) soit légèrement plus importantes que les rejets thermiques des climatisations qui y sont réinjectés. Dans ce mode d'exploitation, la température dans le Puits Y tend à rester relativement homogène du fait des phénomènes de convection naturelle entretenus par une température des roches profondes supérieure à celle de l'eau dans le Puits Y.
2. **Scénario 2** - Solution alternative visant l'exploitation du Puits Y à une température typiquement de 50 °C afin de satisfaire la demande thermique en chauffage, ECS et rafraîchissement selon la technique de distribution en réseau de chaleur incluant la possibilité d'employer des climatisations à sorption. Le chauffage se fait alors par usage direct de la chaleur. Ce scénario se caractérise par l'utilisation d'énergies thermiques, issues de sources fatales ou solaires, devant être largement disponibles afin de pouvoir remplacer l'énergie mécanique ou électrique consommée par les pompes à chaleur des Scénarios 1 et 3. Le Puits Y est employé comme réservoir de stockage.
3. **Scénario 3** - Solution de repli envisageant l'exploitation d'un champ de sondes géothermiques (BTES – Borehole Thermal Energy Storage) en remplacement total ou partiel du Puits Y. Pour ce scénario de repli, le mode de fonctionnement est comparable à celui du scénario 1 et se caractérise par une alternance saisonnière des énergies puisées et

injectées. Toutefois, la température de fonctionnement est inférieure d'une dizaine de degrés à celle du scénario 1.

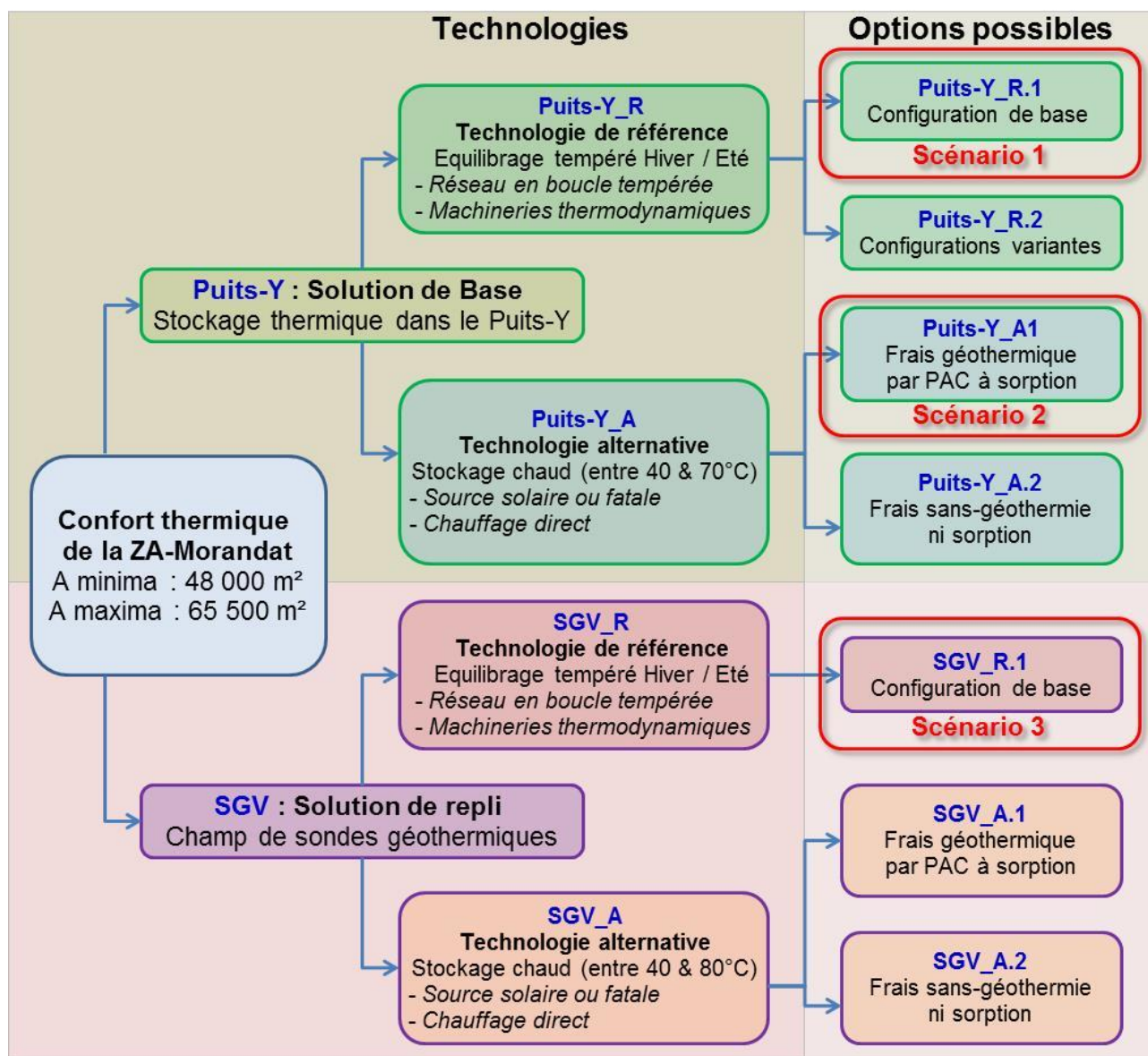


Figure 78 : Schéma logique des scénarios technologiques retenus par le Comité de Pilotage

9.2. CONDITIONS GENERALES DE L'EXAMEN DES TROIS SCENARIOS

Les trois scénarios ont pour objet de donner naissance à un programme pouvant être éligible au Fonds Chaleur Renouvelable au à l'appel à projets NTE de l'ADEME. En ce sens, les informations restituées par la présente étude doivent pouvoir être comparées selon le référentiel proposé par le Fonds Chaleur Renouvelable. Synthétiquement, les trois scénarios se présentent donc comme suit :

	Scénario 1	Scénario 2	Scénario 3	Référence Fonds-Chaleur
Sources d'énergie	• Equilibrage été/hiver du Puits Y • Electricité (PAC et Auxiliaires)	• Solaire thermique et/ou • Energie thermique fatale • Electricité (PAC et Auxiliaires)	• Equilibrage été/hiver d'un champ de sondes • Electricité (PAC et Auxiliaires)	• Gaz (chauffage et ECS) • Electricité (PAC et Auxiliaires)
Réseau d'énergie	• Boucle tempérée • Début hiver : < 30 °C • Début été : > 13 °C	• Réseau de chaleur • Mode Chauffage : > 45 °C • Mode Stockage : > 60 °C	• Boucle tempérée • Début hiver : < 20 °C • Début été : > 5 °C	• Sans objet
Chauffage	• Thermofrigopompes	• Usage direct de la chaleur	• Thermofrigopompes	• Chaudière gaz
ECS	• Thermofrigopompes	• Usage direct de la chaleur	• Thermofrigopompes	• Chaudière gaz
Climatisation	• Thermofrigopompes • Appoint aérothermique	• Groupe à sorption • Appoint aérothermique	• Thermofrigopompes • Appoint aérothermique	• Groupe froid aérothermique

Tableau 24 : Tableau synthétique des conditions de l'examen des trois scénarios

Le Fonds Chaleur de l'ADEME stipule différentes dispositions à satisfaire pour être éligible, en particulier pour les réseaux d'énergie thermique ; la principale condition s'exprimant en termes de densité énergétique du réseau. Cette condition est examinée au chapitre 9.3.

D'autres dispositions réglementaires ou incitatives pourraient être à prendre en considération. En particulier, la Comité de Pilotage du 12 janvier 2016 a souhaité que soient examinées les possibilités d'exploitation du Puits Y avec une puissance thermique inférieure à 500 kW. En ce sens, le présent document fait ressortir les puissances moyennes saisonnières qui sont estimées à partir des énergies thermiques échangées sur la base d'un temps de fonctionnement au régime nominal pendant 75 % du temps. A titre d'information, une estimation sommaire de la puissance installée est également indiquée en appliquant le même calcul que ci-dessus mais uniquement appliqué à la courte période la plus exigeante thermiquement, soit en janvier ou en juillet / août selon l'usage concerné.

Il ressort que le scénario 2 se situe automatiquement sous cet indicateur de 500 kW, y compris en termes de puissance installée dans le Puits.

Pour le scénario 1, avec cette méthode de calcul, l'estimation de la puissance thermique installée peut ponctuellement se situer en limite haute de cet indicateur. Par contre, les puissances saisonnières moyennes restent nettement sous cet indicateur.

La remarque ci-dessus pour le scénario 1 vaut également pour le scénario 3. **Pour ces deux scénarios, il n'y a pas d'énergie puisée dans le sous-sol ni dissipée dans le sous-sol.**

9.3. RESEAU PRIMAIRE D'ENERGIE SIMILAIRE POUR LES TROIS SCENARIOS

Toutes les configurations de réseau d'énergie envisagées pour les trois scénarios visent un fort taux d'utilisation du fait d'un emploi pour le chauffage, pour l'ECS et pour le rafraîchissement.

En effet, il convient également de considérer l'utilisation du réseau durant les périodes de puisage et durant les périodes de stockage dans le Puits Y (ou dans le champ de sondes géothermiques pour le scénario 3) ; période durant lesquelles de l'énergie fatale et/ou de l'énergie solaire est ainsi valorisée.

Une difficulté réside dans l'estimation des investissements liés au déploiement du réseau de chaleur, en boucle tempérée (très basse température) pour les scénarios 1 et 3 comme à basse température pour le scénario 2 (moins de 90 °C). En effet, le linéaire ne peut aucunement être envisagé avec précision à ce jour au regard des informations disponibles pour la réalisation de la présente étude.

Un calcul inverse est donc proposé qui vérifie si le réseau primaire satisfait les critères pour les aides de l'ADEME.

Pour cela, il sera notamment possible de s'appuyer, en première approximation, sur les estimations reportées dans l'étude ADEME/PERDURANCE du 9 avril 2009 pour exprimer la densité énergétique du réseau, c'est-à-dire le rapport entre l'énergie thermique distribuée et la longueur du réseau. Cette densité énergétique conditionne l'éligibilité aux aides de l'ADEME qui fixe une limite minimale de 1,5 MWh/m et propose une valeur recommandée égale à 3 MWh/m.

Le calcul estimatif est alors le suivant :

En première approche, on peut considérer que les besoins géothermiques pour le mode chaud, c'est-à-dire ceux livrés par le réseau en boucle tempérée, sont de l'ordre de 1 300 MWh/an. Les besoins pour le rafraîchissement sont du même ordre de grandeur, ce qui fait au total une quantité d'énergie livrée de l'ordre 2 600 MWh.

Dans ces conditions, la limite minimale de densité énergétique fixée par l'ADEME conduit à une longueur maximale de réseau de 1 700 mètres et à une longueur recommandée de 870 mètres.

Il est ici proposé de considérer cette valeur de 870 m comme étant représentative de l'investissement pour le réseau primaire, c'est à dire en amont des sous-stations. Cette longueur pour le réseau primaire paraît réaliste ; la ZA Morandat étant circonscrite dans un périmètre rectangulaire de 550 m par 350 m, avec le Puits Y pratiquement en son centre.

En s'inspirant de l'étude ADEME / PERDURANCE (Tableau 25), on retiendra une estimation de l'investissement de l'ordre de 350 €HT par mètre linéaire ; cela dans l'hypothèse où sa réalisation serait synchronisée avec les autres travaux de VRD pour les aménagements neufs.

Dans ces conditions, l'investissement spécifique pour le réseau primaire pourrait être de l'ordre de 300 k€ HT et on admettra qu'il est le même pour tous les scénarios.

Puissance	Linéaire	Unitaire
kW	m	€/m
250	125	300
1000	500	315
4000	2000	480

Tableau 25 : Hypothèses d'implantation pour un réseau de chaleur (Source Ademe/Perdurance, 2009)

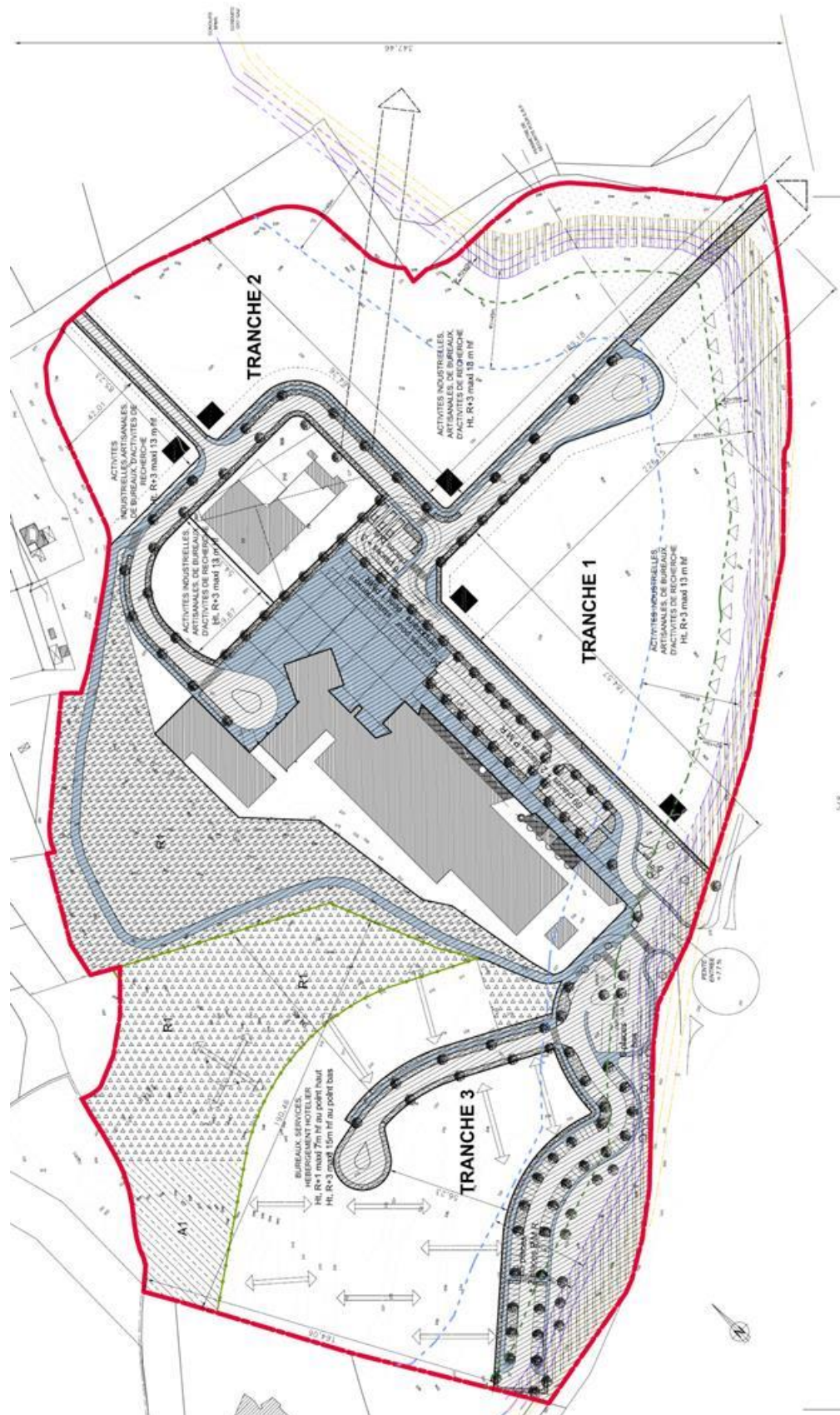


Figure 79 : Plan masse de la ZA Morandat et des tranches d'aménagement

9.4. EXAMEN DU SCENARIO 1 – EXPLOITATION TEMPEREE DU PUITS Y

9.4.1. Présentation du scénario 1 - Stockage alterné dans le Puits Y, Boucle tempérée

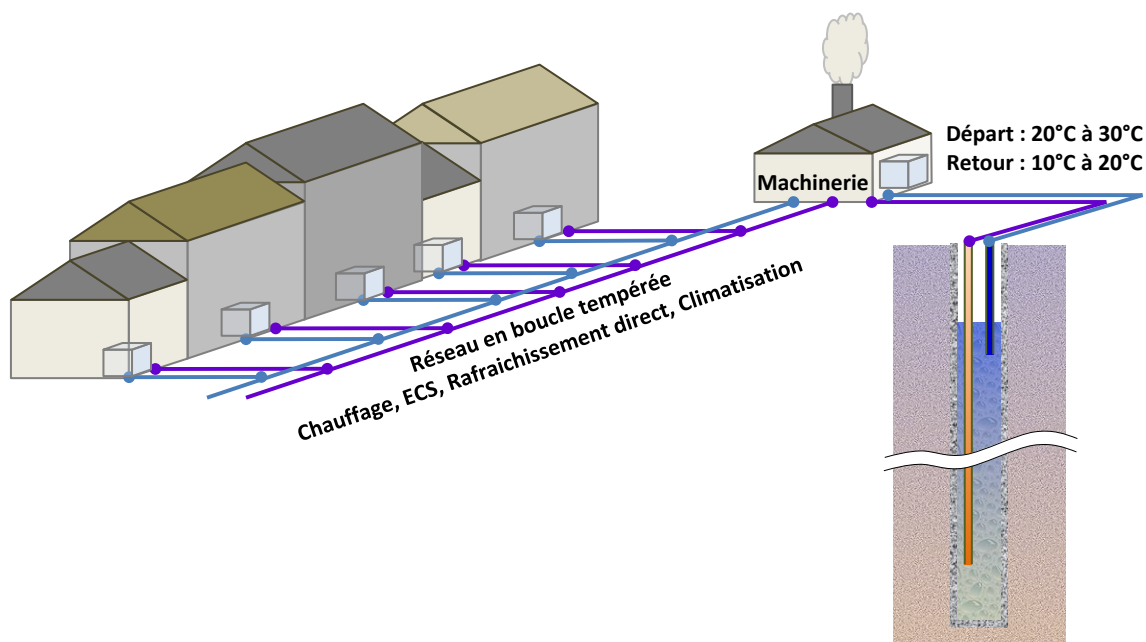


Figure 80 : Scénario 1 - Stockage équilibré dans le Puits Y et distribution en boucle tempérée

Au moyen d'un réseau d'énergie en boucle tempérée, la solution examinée pour le scénario 1 distribue alternativement une eau plutôt tiède en saison hivernale et une eau plutôt fraîche (si possible) en saison estivale :

- La température de production recherchée dans le Puits Y en début de saison hivernale est de l'ordre de 25 °C à 30 °C. Le chauffage et l'ECS sont fournis par des pompes à chaleur ; lesquelles rejettent de l'énergie frigorifique. La température dans le Puits Y baisse progressivement au fil de la saison hivernale.
- La température de production recherchée dans le Puits Y en début de saison estivale est de l'ordre de 10 °C à 15 °C. Si possible le rafraîchissement direct est exploité. La climatisation est fournie par des pompes à chaleur ; lesquelles rejettent de la chaleur. La température dans le Puits Y augmente progressivement au fil de la saison estivale.

Le Puits Y est donc exploité exclusivement comme un stockage thermique saisonnier, alternativement tiède et frais. Sa capacité de stockage thermique reste limitée et doit donc être gérée par anticipation :

Le principe est que l'énergie frigorifique stockée en saison hivernale doit être du même ordre de grandeur que la chaleur stockée en saison estivale. A titre indicatif, sans aménagement particulier, l'énergie correspondant à un écart saisonnier de la température de 15 °C dans le Puits Y est de l'ordre de 1,3 GWh.

Cette capacité de stockage thermique représentée par le Puits Y est du même ordre de grandeur que les besoins annuels en chauffage et ECS de toute la ZA Morandat mais elle est inférieure aux quantités que rejetteraient les climatisations selon les estimations proposées par le bureau d'étude BG.

Il peut alors être recommandé d'abaisser les besoins en rafraîchissement ou de recourir à des échanges aérothermiques afin de rejeter certains excédents thermiques.

9.4.2. Indicateurs économiques et "performantiels" pour le scénario 1

Ce scénario nécessite l'équilibrage des énergies injectées et puisées dans le Puits Y. Pour cette raison, il a été supposé que la demande cumulée en climatisation exploitant le Puits Y sur la totalité du bâti de la ZA Morandat à la fin du programme de construction était abaissée à 1 217 MWh/an au lieu de 1 758 MWh/an, soit l'équivalent de 540 MWh/an devant résulter d'un abaissement de la demande ou relever d'autres moyens de production. Ces solutions ne sont pas explicitées ci-dessous.

	Demande thermique spécifique utile du bâti			Froid selon étude BG (kWh/m².an)
	Chauffage (kWh/m².an)	ECS (kWh/m².an)	Froid (kWh/m².an)	
Tertiaire rénové	40	5	50	50
Entreposage	40	0	0	0
Centre-Multi-Culturel	40	5	5	50
Hôtellerie	20	20	25	25
Tertiaire-Rafrica	20	5	5	25
Tertiaire neuf	20	5	25	25
Hôtel Entreprises	40	5	25	25

Avec les conditions ci-dessus, en fin de programme de construction les demandes thermiques annuelles cumulées seraient les suivantes :

	Demande thermique utile du bâti			Froid selon étude BG (MWh/an)
	Chauffage (MWh/an)	ECS (MWh/an)	Froid (MWh/an)	
Tertiaire rénové	42	5	53	53
Entreposage	26	0	0	0
Centre-Multi-Culturel	178	22	22	222
Hôtellerie	70	70	88	88
Tertiaire-Rafrica	341	85	85	426
Tertiaire neuf	740	185	925	925
Hôtel Entreprises	72	9	45	45

La simulation est initiée avec une température de départ dans le stockage de 28°C et l'objectif est une température dans le stock n'atteignant pas 35 °C en fin de saison estivale afin d'assurer un EER restant acceptable pour les groupes. Les paramètres généraux sont les suivants :

Température initiale du stock	28	°C
Une énergie de	1 288 560	kWh échangée avec le Puits Y
correspond à un de changement de	15	°C de la température du stock

Contrairement au scénario 2, les pertes thermiques dans le Puits Y sont négligeables du fait d'une température moyenne du stockage comparable à la température des roches encaissantes. Par contre, les fluctuations de la température dans le Puits Y influencent grandement les performances des thermofrigopompes et donc les consommations afférentes d'énergie électrique. Les données d'entrée du modèle de performance sont les suivantes :

COP machine :	4,5	à :	12,00	°C et taux de :	3%	par °C
EER machine :	5,5	à :	12,00	°C et taux de :	3%	par °C

Avec les conditions d'entrée ci-dessus, la température en fin de saison estivale dépasse 30 °C et approche donc le domaine de l'usage direct de la chaleur pour le chauffage. Le COP machine des pompes à chaleur est alors élevé. Par contre, la température dans le stockage ne descend jamais sous 20 °C et l'EER des machines thermodynamiques reste globalement assez moyen, même s'il ressort encore à un niveau plus favorable que celui des groupes aérothermiques. En tenant compte des fluctuations de la performance des machines thermodynamiques, l'estimation des échanges thermiques serait la suivante pour les cinq premières années :

Stockage	Energie échangée		Performance des machines	
	Puisage hivernal (MWh/an)	Injection estivale (MWh/an)	$COP_{machine}$ moyen	$EER_{machine}$ moyen
2018	113.8	-107.3	7.2	3.4
2019	462.0	-495.6	7.1	3.5
2020	824.4	-897.3	7.1	3.5
2021	1 282.9	-1 247.7	7.1	3.6
2022	1 280.3	-1 244.3	7.0	3.6

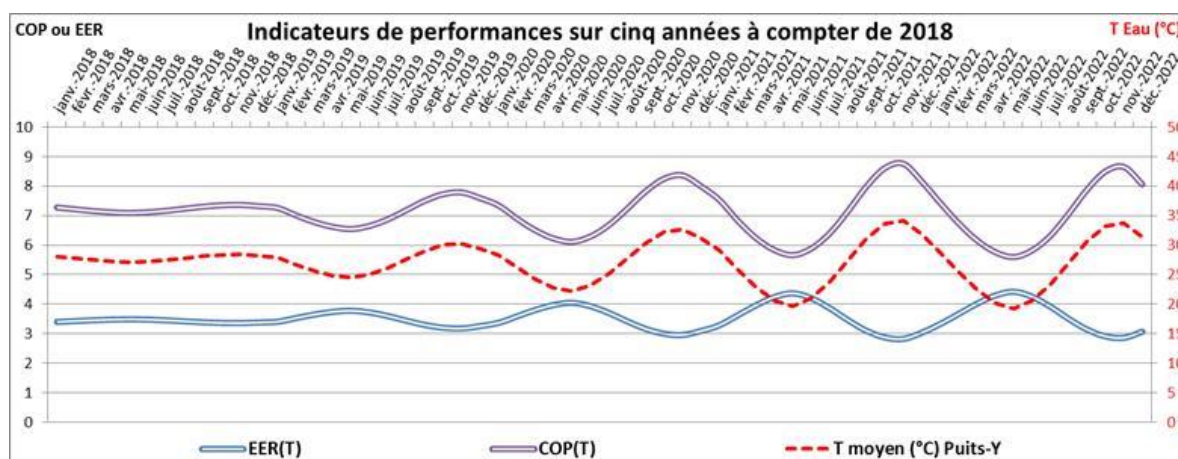


Figure 81 : Indicateurs de performance du scénario 1 durant les 5 premières années

Dans le contexte exprimé ci-dessus, la simulation au pas de temps mensuel conduit à un fonctionnement thermique tel que représenté par la Figure 82 ci-dessous.

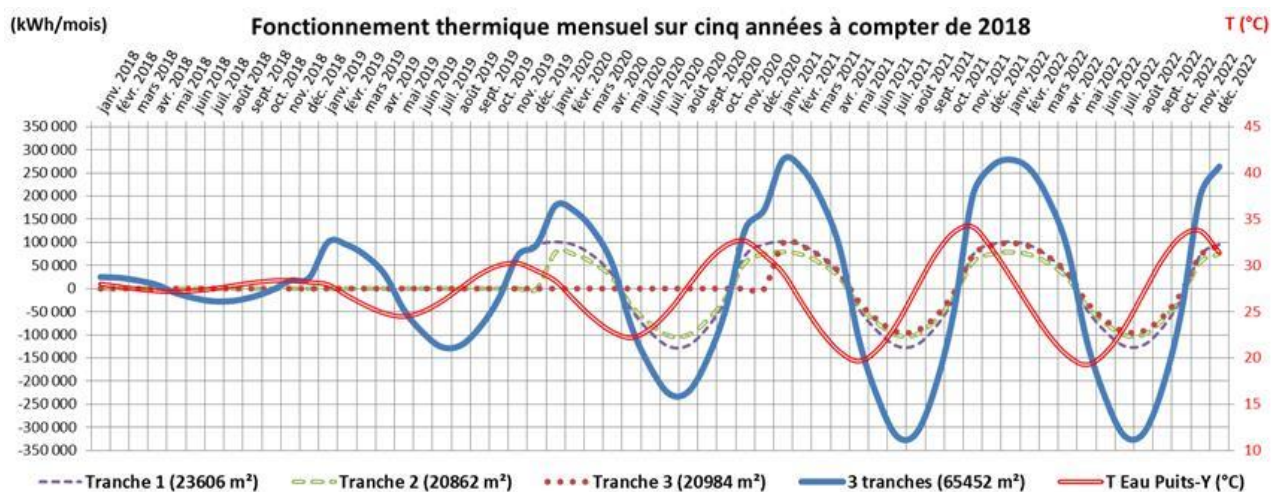


Figure 82 : Simulation du fonctionnement thermique pour le scénario 1 les 5 premières années

On peut constater sur la Figure 81 et la Figure 82 ci-dessus que le scénario 1 se caractérise par une utilisation du stockage représenté par le Puits Y pratiquement à sa capacité maximale. En outre, la condition d'un puisage hivernal au moins égal à l'injection de chaleur estivale est satisfaite :

Dès la 5^{ème} année, la quantité d'énergie qui serait à stocker chaque année en saison estivale s'établirait alors à 1,25 GWh/an. Ce régime se reproduit alors à l'identique pour les années suivantes.

Les moyennes saisonnières des puissances thermiques sont alors les suivantes pour les cinq premières années ; le débit saisonnier d'eau pour échanger de la chaleur avec le Puits Y restant sous 50 m³/h :

Stockage	Puissance saisonnière moyenne		Débit saisonnier moyen	
	Hiver (kW _{GTH} /h)	Eté (kW _{GTH} /h)	Hiver (m ³ /h)	Eté (m ³ /h)
2018	34.0	-32.0	4.2	3.9
2019	138.0	-148.0	16.9	18.2
2020	246.2	-268.0	30.2	32.9
2021	383.2	-372.7	47.0	45.8
2022	382.4	-371.7	46.9	45.6

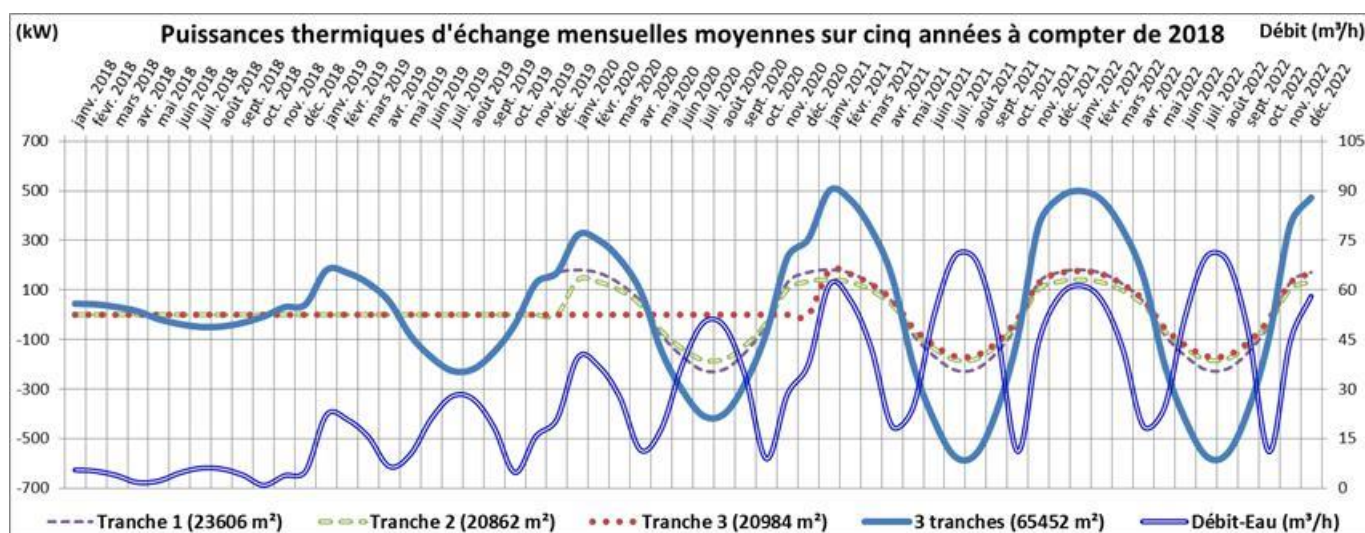


Figure 83 : Scénario 1 - Puissances d'échange thermique avec le Puits Y et débits afférents

Le dimensionnement indicatif de la puissance à installer peut s'obtenir en considérant une durée de fonctionnement équivalente à 75 % du temps pendant le mois le plus exigeant, en l'occurrence 558 heures en juillet. La puissance d'échange avec le Puits Y ressort alors à 578 kW et le débit afférent est de 70 m³/h.

Commentaire : techniquement, on peut admettre que cette puissance n'est que rarement appelée et peut correspondre en fait à une surpuissance. Usuellement, la surpuissance admissible peut atteindre 20 % au-delà de la puissance nominale, qui serait alors dans le cas présent significativement inférieure à 500 kW. Dans la pratique, la surpuissance peut s'obtenir avec des variateurs de fréquence adaptés, ou en dupliquant les ouvrages.

Le schéma en Figure 84 ci-dessous synthétise les flux énergétiques globaux pour le système envisagé pour le scénario 1 qui est axé sur un échange équilibré entre puisage hivernal et

injection estivale obtenu en maintenant la température de l'eau dans le Puits Y sous 35 °C de manière à rester à une température moyenne dans le stockage équivalente à celle des roches encaissantes. Ce point de fonctionnement suppose une optimisation du système, *a minima* une production de l'ECS à partir des excédents des climatisations.

Dans ces conditions, les estimations indicatives pour les consommations en énergie électrique nécessaires pour actionner les pompes à chaleur et la circulation sont les suivantes :

- Pour les pompes à chaleur en saison hivernale : 270 MWh
- Pour les pompes à chaleur en saison estivale : 340 MWh
- Pour assurer les échanges thermiques avec le Puits Y : 4 % de l'énergie, soit 100 MWh

Au total, la consommation d'énergie électrique s'établirait à : 710 MWh.

Cette énergie électrique est la seule énergie non-renouvelable employée par le système correspondant au scénario 1. Elle correspond à environ 23,2% de l'énergie finale/utile livrée.

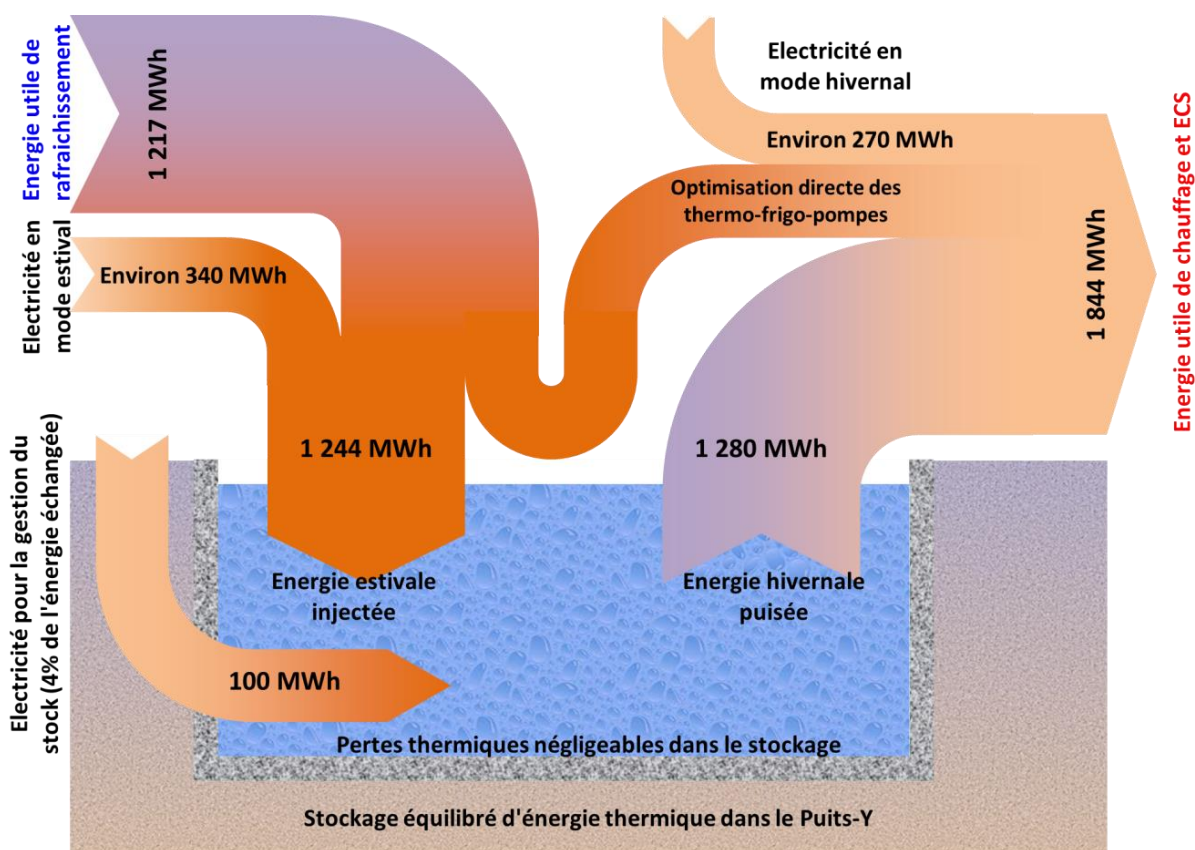


Figure 84 : Bilan énergétique indicatif pour le scénario 1 pour la cinquième année

Note de compréhension : Le schéma ci-dessus optimise les bénéfices pouvant résulter des capacités de stockage de court-terme en intersaison, lorsqu'il y a alternance rapide entre demandes de chauffage et climatisation. Les périodes concernées sont Avril/Mai et Octobre. Le concepteur pourra préférer l'exploitation du Puits Y à l'installation de certaines capacités tampon au niveau des machineries thermodynamiques, ce qui reste sans incidence sur le dimensionnement des équipements géothermiques. Ci-dessus, les énergies échangées avec le Puits Y pourront donc être réévaluées. Les quantités concernées par ces cycles court-terme resteraient de l'ordre de 5% de l'énergie stockée ou déstockée.

9.4.3. Eléments d'investissement spécifiques au scénario 1

L'équipement spécifique au scénario 1 est l'équipement du Puits Y, qui est supposé identique à celui du scénario 3. Selon les hypothèses (voir ci-dessous) les coûts s'échelonnaient entre 1 283 k€ HT et 1 764 k€ HT.

On retiendra l'hypothèse médiane de 1 500 k€ HT pour l'équipement du Puits Y.

Cas de deux ensembles de deux ouvrages Injection & Production	Injecteur 1100 mètres Producteur 350 mètres Nombre d'unité 2 unités Composite 200 €/m				Injecteur 1100 m Producteur 350 m Nombre d'unité 2 unités Acier Inox 100 €/m			
	1 763.3	100.0%	1 763.3	100.0%	1 473.3	100.0%	1 473.3	100.0%
Plate-forme	100.0	5.67%	100.0	5.67%	100.0	6.79%	100.0	6.79%
Machine de forage – Mise en place	650.0	36.86%			650.0	44.12%		
amené/ repli/ripage		300.0	17.01%			300.0	20.36%	20.71%
location machine		300.0	17.01%			300.0	20.36%	20.71%
fuel		50.0	2.84%			50.0	3.39%	3.45%
Tubages, vissage, accessoire	580.0	32.89%	580.0	32.89%	290.0	19.68%	290.0	19.68%
Essais de puits & mesures	50.0	2.84%	50.0	2.84%	50.0	3.39%	50.0	3.39%
Supervision et contrôle	83.3	4.73%	83.3	4.73%	83.3	5.66%	83.3	5.66%
Divers, imprévus	83.3	4.73%	83.3	4.73%	83.3	5.66%	83.3	5.66%
Têtes de puits	50.0	2.84%	50.0	2.84%	50.0	3.39%	50.0	3.39%
Pompes et colonne d'exhaure	100.0	5.67%	100.0	5.67%	100.0	6.79%	100.0	6.79%
Assurance TRV et franchise	66.7	3.78%	66.7	3.78%	66.7	4.52%	66.7	4.52%

Cas d'un ensemble de deux ouvrages Injection & Production	Injecteur 1100 mètres Producteur 350 mètres Nombre d'unité 1 unité Composite 240 €/m				Injecteur 1100 m Producteur 350 m Nombre d'unité 1 unité Acier Inox 120 €/m			
	1 456.3	100.0%	1 456.3	100.0%	1 282.3	100.0%	1 282.3	100.0%
Plate-forme	100.0	6.87%	100.0	6.87%	100.0	7.80%	100.0	7.80%
Machine de forage – Mise en place	650.0	44.63%			650.0	50.69%		
amené/ repli/ripage		300.0	20.60%			300.0	23.39%	20.71%
location machine		300.0	20.60%			300.0	23.39%	20.71%
fuel		50.0	3.43%			50.0	3.90%	3.45%
Tubages, vissage, accessoire	348.0	23.90%	348.0	23.90%	174.0	13.57%	174.0	13.57%
Essais de puits & mesures	50.0	3.43%	50.0	3.43%	50.0	3.90%	50.0	3.90%
Supervision et contrôle	83.3	5.72%	83.3	5.72%	83.3	6.50%	83.3	6.50%
Divers, imprévus	83.3	5.72%	83.3	5.72%	83.3	6.50%	83.3	6.50%
Têtes de puits	25.0	1.72%	25.0	1.72%	25.0	1.95%	25.0	1.95%
Pompes et colonne d'exhaure	50.0	3.43%	50.0	3.43%	50.0	3.90%	50.0	3.90%
Assurance TRV et franchise	66.7	4.58%	66.7	4.58%	66.7	5.20%	66.7	5.20%

Tableau 26 : Coûts d'investissement spécifiques pour le scénario 1

9.5. EXAMEN DU SCENARIO 2 – Puits Y PORTE A HAUTE TEMPERATURE

9.5.1. Présentation du scénario 2 - Stockage chaud dans le Puits Y, Réseau de chaleur

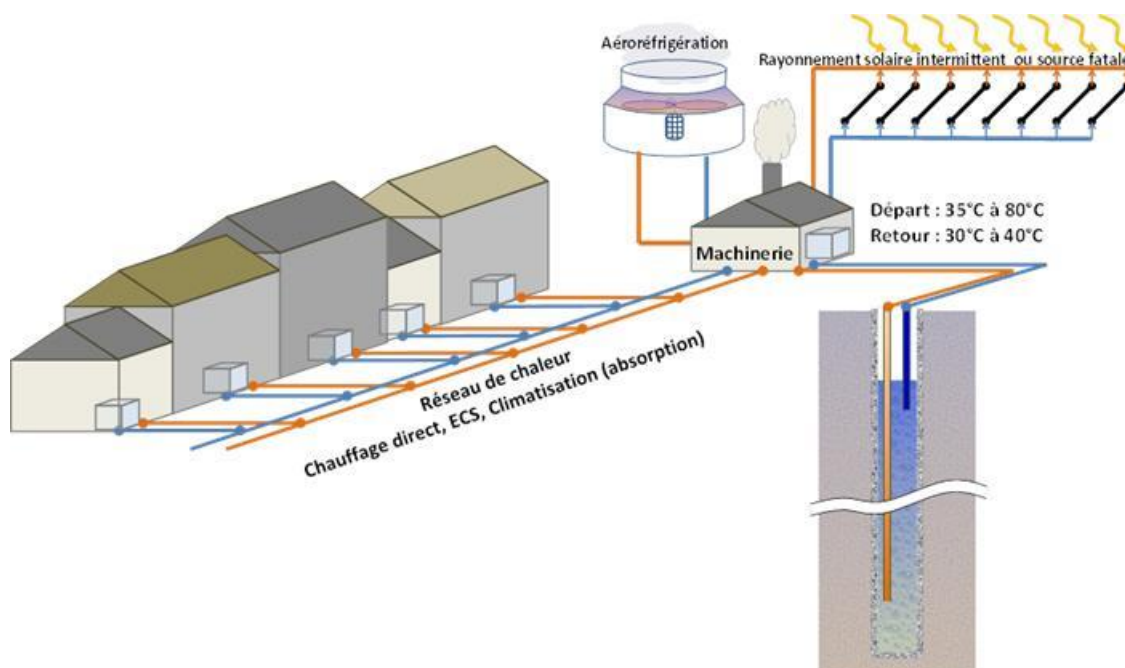


Figure 85 : Scénario 2 -Stockage chaud dans le Puits Y et distribution en réseau de chaleur

Au moyen d'un réseau de chaleur, la solution représentée par le scénario 2 distribue une eau constamment chaude résultant d'une combinaison entre la chaleur directement fournie par une source solaire et/ou fatale et celle extraite du Puits Y où est périodiquement stockée de la chaleur, également issue de la source solaire et/ou fatale ; ce stockage permettant de rendre cette énergie disponible en permanence :

- La température de production recherchée dans le Puits Y en fin de saison hivernale est *a minima* de l'ordre de 35 °C à 40 °C afin de permettre le chauffage direct sans recourir à des pompes à chaleur. L'ECS bénéficie *a minima* d'un préchauffage.
- La température de production recherchée dans le Puits Y en début de saison estivale est, si possible, supérieure à 70°C afin de contribuer efficacement à la climatisation au moyen de groupes à sorption (adsorption ou absorption).

Le Puits Y constitue donc un stockage d'énergie qui est constamment maintenu en température à l'aide de sources solaires et/ou fatales abondantes mais dont les disponibilités ne sont pas toujours en phase avec les demandes de la ZA Morandat. Puisque le stock thermique dans le Puits Y peut être fréquemment régénéré, sa capacité ne constitue pas une réelle limite.

En première approche, l'écart de la température pouvant être typiquement exploité dans le Puits Y serait de l'ordre de 15 °C à 25 °C et la température en saison estivale pourrait atteindre 70 °C dans le cas d'une source solaire exploitée par panneaux plans ; ce niveau de la température n'étant cependant pas nécessairement un objectif à atteindre une valeur de 50 °C paraît être un compromis acceptable limitant les pertes thermiques.

Une première estimation indique qu'il faudrait de l'ordre de 4,5 GWh d'énergie thermique d'origine solaire, exploitée en direct ou indirectement via le Puits Y, pour satisfaire l'ensemble des besoins pour le confort thermique de la ZA Morandat, soit de l'ordre de 7 200 m² de panneaux plans. Cela ne représenterait qu'environ un quart des toitures des bâtiments prévus sur la ZA Morandat.

9.5.2. Indicateurs économiques et "performantiels" pour le scénario 2

Pour lui être comparable, le scénario 2 reprend exactement les mêmes demandes thermiques du bâti que le scénario 1, même si les limites inhérentes aux rejets thermiques des climatisations sont sans objet pour le scénario 2 du fait de la technologie de climatisation solaire à sorption n'utilisant guère le stockage dans le Puits Y. Avec une efficacité des groupes à sorption de 0,5, les demandes en énergie thermique à satisfaire sont :

	Demande thermique utile du bâti			Demande solaire pour la sorption (kWh/m ² .an)
	Chauffage (kWh/m ² .an)	ECS (kWh/m ² .an)	Froid (kWh/m ² .an)	
Tertiaire rénové	40	5	50	100.0
Entreposage	40	0	0	0.0
Centre-Multi-Culturel	40	5	5	10.0
Hôtellerie	20	20	25	50.0
Tertiaire-Rafraichi	20	5	5	10.0
Tertiaire neuf	20	5	25	50.0
Hôtel Entreprises	40	5	25	50.0

Avec ces demandes, le scénario 2 justifie, à l'issue du programme de construction, une implantation de 7 200 m² de panneaux solaires thermiques, soit 11% des surfaces SHON. Cette surface représente moins de la moitié des superficies au sol des bâtiments ; ce qui ménage la possibilité d'une installation intégrale en toiture. Sur le secteur de Gardanne, l'énergie solaire incidente est de 1,57 MWh/m².an. L'efficacité des panneaux solaires thermiques actuels étant très supérieure à 40 %, la simulation prend en compte une fraction solaire captée par défaut de 40 %, soit 629 kWh/m².an correspondant à une fraction captée totale de 4,6 GWh/an.

Solaire annuel incident	1 572	kWh/m ² .an
Thermique annuel capté	40,0 %	
Thermique annuel capté	629	kWh/m ² .an
Ratio panneaux solaires / SHON	11,0 %	m ² solaire/m ² _{SHON}
SHON en fin de phase 3	65 000	m ²
Fraction solaire totale captée	4.5	GWh/an

La simulation est initiée avec une température de départ dans le stockage de 50 °C et l'objectif est une température dans le stock ne descendant jamais sous 40 °C afin d'assurer le chauffage en usage direct de la chaleur déstockée. Les paramètres généraux sont les suivants :

Température initiale du stock	50	°C
Une énergie de	1 288 560	kWh échangée avec le Puits Y
correspond à un de changement de	15	°C de la température du stock

Contrairement au scénario 1, les pertes thermiques ne sont plus négligeables du fait d'une température moyenne du stockage significativement supérieure à la température des roches encaissantes. En première approximation, on peut représenter les pertes par une fonction linéaire de la température. Les conditions d'entrée employées par le modèle sont les suivantes :

T annuel moyen de	30	°C : =>	0 %	de perte annuelle
T annuel moyen de	70	°C : =>	50 %	de perte annuelle
Exemple : T annuel moyen =	50	°C : =>	25 %	de perte annuelle
Pour une injection de	1,3	GWh/an	325	MWh de pertes

La simulation (Figure 86) suppose une priorité à l'usage direct de la chaleur solaire, éventuellement *via* des ballons tampons. Les injections de chaleur solaire excédentaire ou puisages de chaleur dans le Puits Y sont ensuite opérés au prorata des surfaces supposées être raccordées. Le pas de temps de la simulation est le mois.

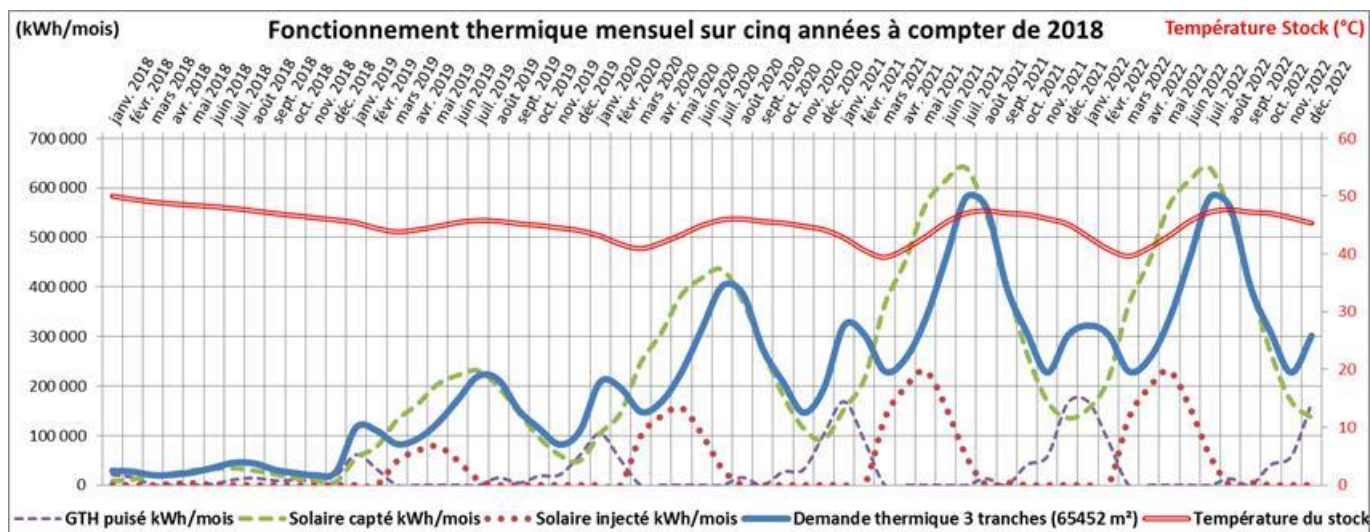


Figure 86 : Simulation simplifiée du fonctionnement thermique pour le scénario 2 les 5 premières années

On peut constater sur la figure ci-dessus que le scénario 2 se caractérise par une utilisation modérée du stockage représenté par le Puits Y.

En effet, du fait de la disponibilité de la ressource solaire sur le secteur de Gardanne, il peut être raisonnablement envisagé de procéder au rafraîchissement des locaux sans pratiquement avoir à solliciter le Puits Y ; cela évidemment à condition de doter les diverses machineries thermodynamiques réparties sur la ZA Morandat de stockage court-terme, soit pour la chaleur issue des panneaux solaires, soit pour le fluide réfrigéré produit par les groupes à sorption.

De même, en période hivernale, la disponibilité de la ressource solaire étant significative, seule une fraction de l'énergie doit provenir du stockage inter-saisonnier matérialisé par le Puits Y.

Selon l'esquisse de simulation correspondant à la Figure 86 ci-dessus, la quantité d'énergie qui serait à stocker en saison estivale s'établirait à moins de 800 MWh/an en prenant en considération des pertes thermiques évaluées à moins de 240 MWh/an, vu le niveau moyen de la température du stock. En effet, les besoins de déstockage thermique en saison hivernale sont estimés à environ 540 MWh/an.

Avec les conditions ci-dessus et en prenant comme hypothèse que les équipements fonctionnent 75 % du temps (soit 558 heures les mois les plus sollicités), les puissances à installer dans le Puits Y et les débits pour un ΔT de 7°C entre entrée et sortie dans le Puits Y seraient :

- Puissance en mode stockage estival : 415 kW (51 m³/h)
- Puissance en mode déstockage hivernal : 305 kW (37 m³/h)

En considérant un fonctionnement exclusivement au régime nominal (donc sans variation de puissance), l'équivalent de temps de fonctionnement serait de 2 000 heures par an.

Nota : le commentaire proposé pour le scénario 1 relatif aux surpuissances reste valable.

A noter également qu'un dimensionnement à 50 % de temps le mois le plus chargé, conduirait à des puissances en mode stockage et déstockage respectivement portées à 620 kW (76 m³/h) et 455 kW (56 m³/h).

Le schéma en Figure 87 ci-dessous synthétise les flux énergétiques globaux pour le système envisagé qui est axé sur le maintien d'une température de l'eau dans le Puits Y suffisante, entre 40 °C et 50 °C, pour assurer le chauffage direct par des émetteurs à basse température.

Si le chauffage est intégralement opéré en échange direct, c'est à dire sans machine thermodynamique ni appoint thermique, l'ECS suppose ici que la ressource solaire est employée pour satisfaire les conditions réglementaires en termes de température.

Dans ces conditions, l'énergie électrique nécessaire pour la fourniture du chauffage et de l'ECS représente uniquement l'énergie pour le pompage. On retiendra en première approche les consommations suivantes :

- Pour l'énergie stockée/déstockées : 4% de l'énergie échangée, soit 53 MWh
- Pour l'énergie solaire en usage direct : 2,5 % de l'énergie, soit 33 MWh

Le rafraîchissement est, quant à lui, supposé être réalisé à partir de moyens ne mobilisant pratiquement pas le stockage dans le Puits Y. On retiendra en première approche les consommations suivantes d'énergie électrique :

- Pour l'énergie utile de rafraîchissement : 10 % de l'énergie livrée, soit 122 MWh

Au total, la consommation d'énergie électrique s'établirait à moins de 210 MWh.

C'est la seule énergie non-renouvelable employée par le système correspondant au scénario 2.

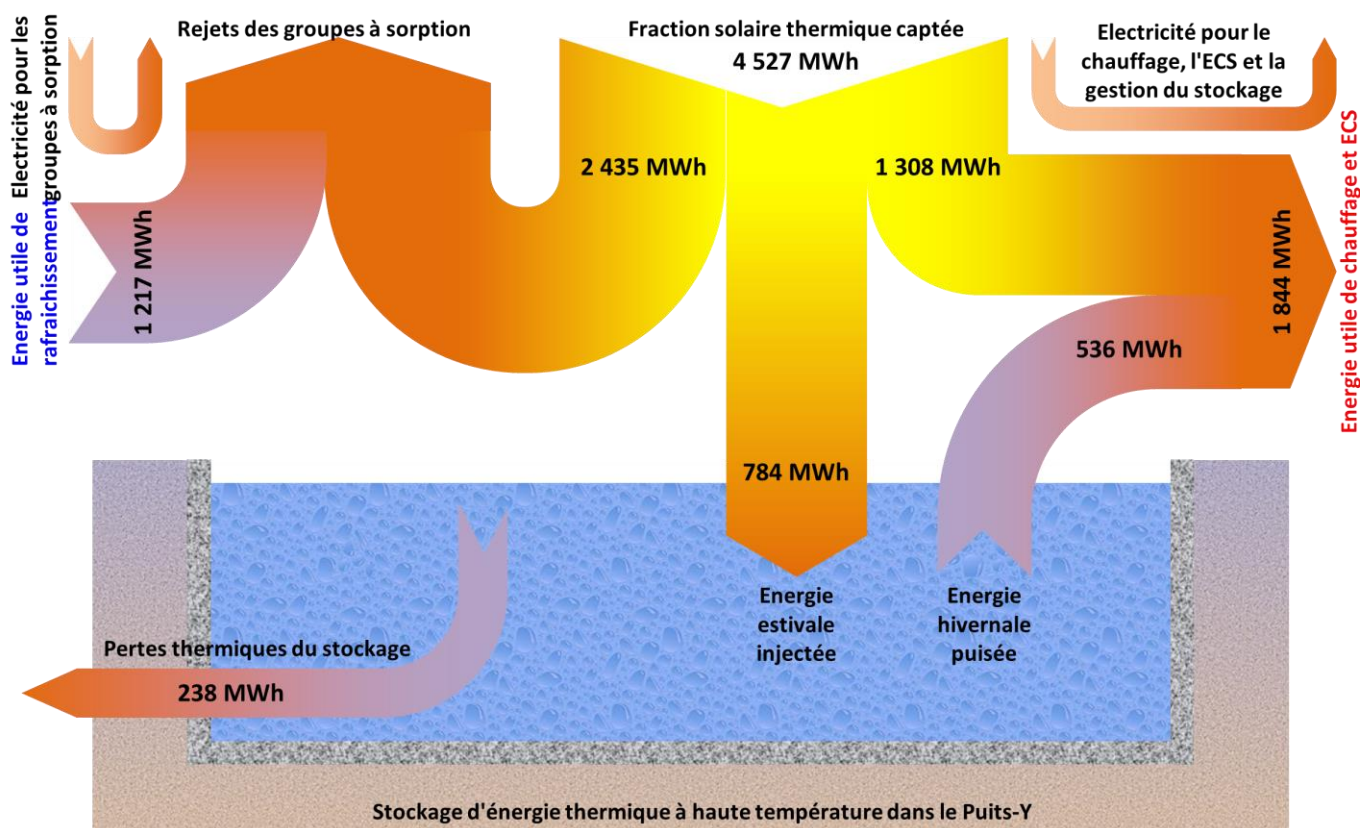


Figure 87 : Bilan énergétique indicatif pour le scénario 2 pour la cinquième année

9.5.3. Eléments d'investissement spécifiques au scénario 2

Pour ce scénario, tous les composants du réseau primaire d'énergie sont supposés comparables à ceux du scénario 1 et du scénario 3. L'équipement du Puits Y est supposé identique à celui du scénario 1. Sont donc spécifiques :

- Le champ solaire
- Les machines thermodynamiques

En première approche, on peut estimer l'investissement sur la base des estimations connues pour les climatisations solaires, même si les puissances répertoriées sont très inférieures à la puissance cumulée à l'échelle de la ZA Morandat (aucun grand champ solaire en France). Sur la totalité du bâti de la ZA Morandat à la fin du programme de construction, la demande annuelle en climatisation à raccorder selon l'étude BG serait de 1 758 MWh/an. Pour le scénario 2, afin d'être comparable avec le scénario 1, la demande annuelle est abaissée à 1 217 MWh/an, soit des puissances utiles à installer respectivement :

- Sur la base d'un fonctionnement à 75 % du temps : de 710 kW et de 500 kW
- Sur la base d'un fonctionnement à 50 % du temps : de 1 100 kW et de 765 kW

En retenant un coût par kW installé 700 €/kW pour le système sans le champ solaire (colonne de droite de la Figure 88 ci-dessous), on obtient comme estimation des investissements :

Pour les panneaux solaires

- 250 € par m² installé, 7 200 m² : 1 800 k€

Pour le reste de l'équipement

- Sur la base d'un fonctionnement à 75% du temps : 497 k€ et 350 k€
- Sur la base d'un fonctionnement à 50 % du temps : 770 k€ et 536 k€

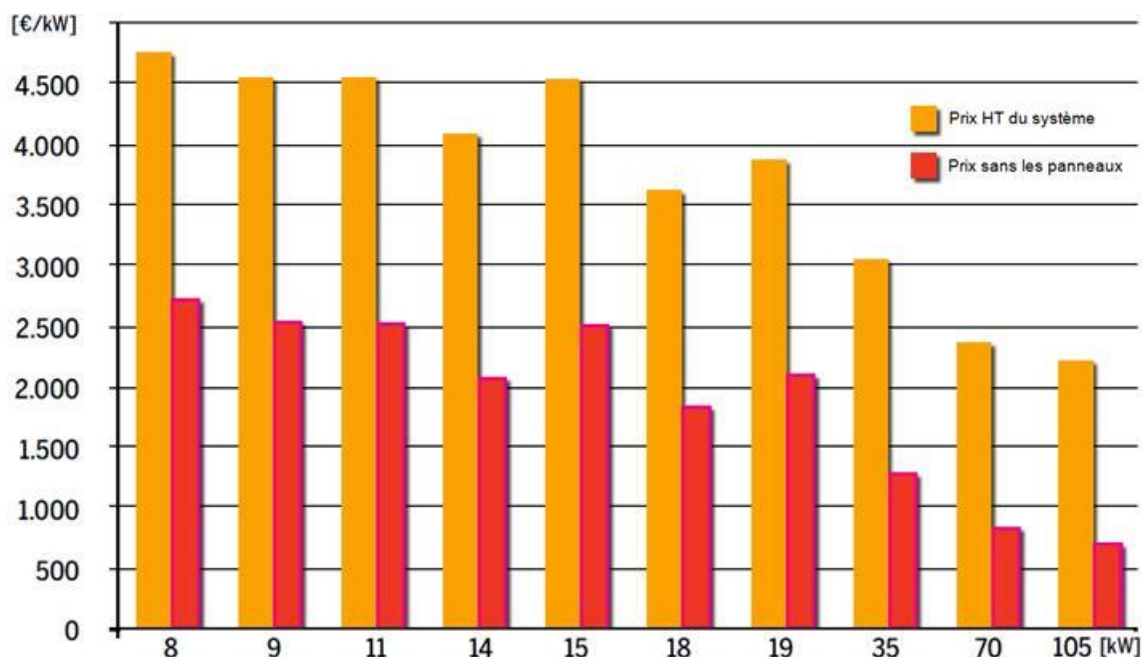


Figure 88 : Prix indicatif d'un système de climatisation solaire
(Source : Solarnext / Solem Consulting, 2011)

En première approche on retiendra donc comme ordre de grandeur :

- Panneaux solaires répartis en toiture : 1 800 k€
- Systèmes de climatisation à sorption répartis : 770 k€

9.6. EXAMEN DU SCENARIO 3 – CHAMP DE SONDES GEOTHERMIQUES

9.6.1. Présentation du scénario 3 – Champ de sondes et Boucle tempérée

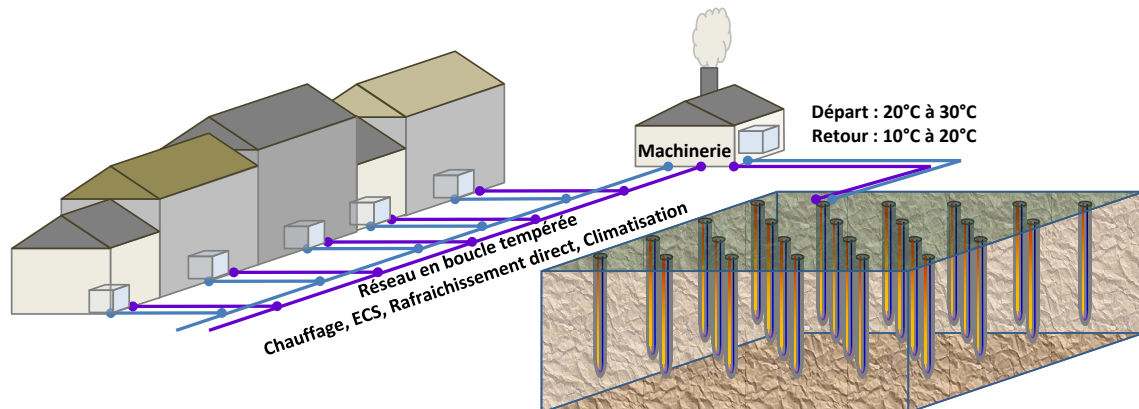


Figure 89 : Scénario 3 - Champ de sondes géothermiques et distribution en boucle tempérée

Sur la ZA Morandat, l'architecture de réseau en boucle tempérée de type "2 tubes" représente la solution de référence. Le chauffage et l'ECS font obligatoirement appel à des pompes à chaleur alors que le rafraîchissement des locaux peut combiner le rafraîchissement direct et la climatisation. A noter que, pour le scénario 1, un réseau "2 tubes" ne permettrait probablement pas l'emploi de la technique du rafraîchissement direct du fait de la température élevée dans le Puits Y.

Dans le présent document, le scénario 3 est une solution connue, bien que récente, qui représente la référence économique en ce qu'il comporte pratiquement les mêmes équipements que le scénario 1 hormis la ressource souterraine qui est un champ de sondes géothermiques et non pas un réservoir comme l'est le Puits Y dans le scénario 1.

Scénario 3	Scénario 1
En début de saison hivernale, la température de départ réseau est typiquement de l'ordre de 20 °C à 22°C et baisse progressivement en cours de saison. Avec un ΔT de l'ordre de 10 °C entre le départ réseau et le retour réseau, la température de retour réseau s'abaisse vers 7 à 8°C en fin de saison ; ce qui génère un stock thermique à moins de 10 °C dans le volume de roche du champ de sondes En début de saison estivale, la température de départ réseau relativement basse permet une large utilisation du rafraîchissement direct, le recours à la climatisation pouvant être évité dans la plupart des cas La performance environnementale provient de la possibilité d'exploiter du rafraîchissement direct en saison estivale.	En début de saison hivernale, la température de départ réseau est typiquement de l'ordre de 28°C à 30 °C alors que la température de retour réseau, donc de réinjection dans le Puits Y, est de l'ordre de 12°C à 13°C, même en fin de saison. Le niveau de la température dans le Puits Y baisse progressivement mais devrait rester supérieur à 15 °C. En début de saison estivale, après la saison de chauffage, la température de départ réseau est de l'ordre de 15 °C. En fin de saison estivale, la réinjection des rejets des climatisations des locaux remonte la température du Puits Y vers la valeur initiale de 28°C à 30 °C. Au-delà d'une telle température, pourrait être constatée une baisse de l'efficacité en mode climatisation. La performance environnementale résulte de l'efficacité de la machinerie thermodynamique, surtout en hiver du fait de la température favorable de l'eau puisée dans le Puits Y.

9.6.2. Indicateurs économiques et "performantiels" pour le scénario 3

Ce scénario nécessite un relatif équilibre des énergies injectées et puisées dans le champ de sondes même si cette contrainte est moins impérative que pour le scénario 1, du fait d'une capacité de stockage pouvant être plus importante que ce que représente le Puits Y.

Néanmoins pour être comparable aux deux premiers scénarios, le scénario 3 reprend exactement les mêmes demandes thermiques du bâti que le scénario 1, y compris la restriction en climatisations raccordées vis-à-vis des estimations de l'étude BG, soit un abaissement de 540 MWh/an, faisant passer la demande raccordée de 1 758 MWh/an à 1 217 MWh/an.

	Demande thermique utile du bâti			Froid selon étude BG (kWh/m².an)
	Chauffage (kWh/m².an)	ECS (kWh/m².an)	Froid (kWh/m².an)	
Tertiaire rénové	40	5	50	50
Entreposage	40	0	0	0
Centre-Multi-Culturel	40	5	5	50
Hôtellerie	20	20	25	25
Tertiaire-Rafrachi	20	5	5	25
Tertiaire neuf	20	5	25	25
Hôtel Entreprises	40	5	25	25

La simulation est initiée avec une température de départ dans le champ de sondes de 15 °C et l'objectif est une température dans le stock n'atteignant pas 20 °C en fin de saison estivale afin d'assurer un bon EER pour les groupes. Les paramètres généraux sont les suivants supposant un champ de sondes relativement compact :

Température initiale du stock	15	°C
Une énergie de	2 500 000	kWh échangée avec le Puits Y
correspond à un de changement de	15	°C de la température du stock

Les pertes thermiques annuelles dans un tel champ de sondes sont négligeables du fait d'une température moyenne du stockage comparable à la température des roches encaissantes. Les fluctuations de la température, même modérées, influencent l'efficacité des thermofrigopompes et donc les consommations afférentes d'énergie électrique. Les données d'entrée du modèle de performance restent les mêmes que pour le scénario 1 :

COP machine :	4,5	à :	12	°C et taux de :	3 %	par °C
EER machine :	5,5	à :	12	°C et taux de :	3 %	par °C

Avec les conditions d'entrée ci-dessus, la température moyenne du champ de sondes en fin de saison estivale n'atteint pas 20 °C.

Sa température en fin de saison hivernale ne descend pas sous 10 °C. Les COP et EER des pompes à chaleur restent peu affectés.

Stockage	Energie échangée		Performance des machines	
	Puisage hivernal (MWh/an)	Injection estivale (MWh/an)	$COP_{machine}$ moyen	$EER_{machine}$ moyen
2018	105.1	-99.6	4.9	5.0
2019	426.8	-462.0	4.9	5.1
2020	761.6	-837.5	4.9	5.1
2021	1 185.9	-1 169.1	4.9	5.1
2022	1 185.0	-1 168.6	4.9	5.1

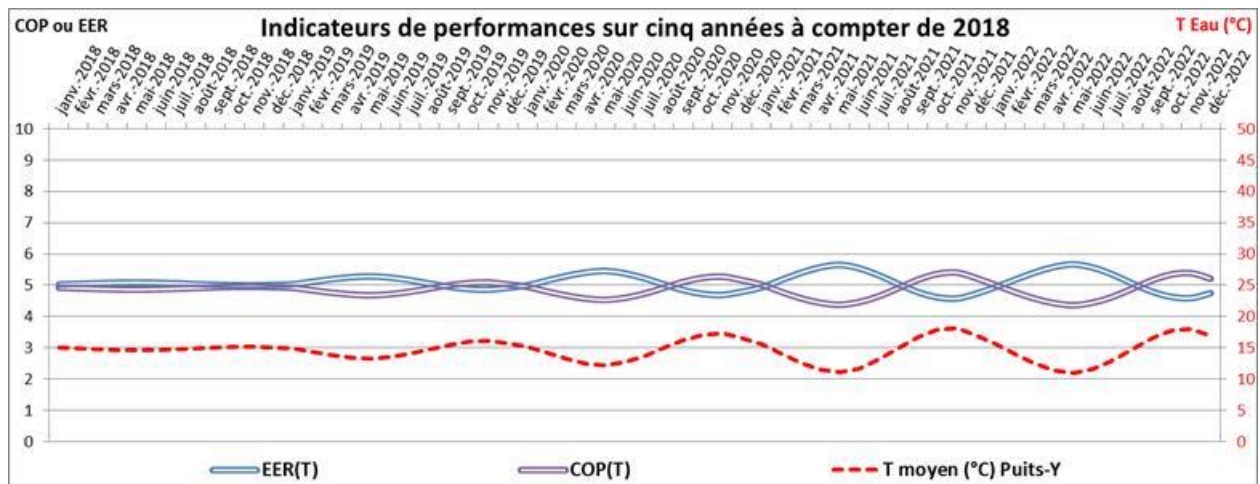


Figure 90 : Indicateurs de performance du scénario 3 durant les 5 premières années

Dans le contexte exprimé ci-dessus, la simulation au pas de temps mensuel conduit à un fonctionnement thermique tel que représenté par la Figure 91 ci-dessous.

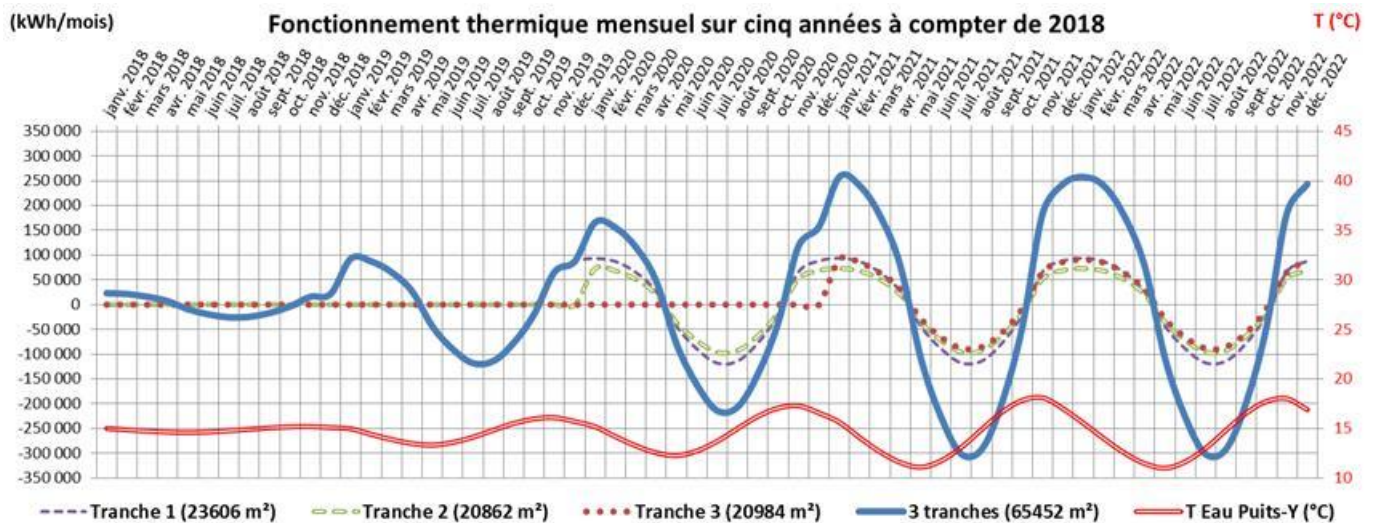


Figure 91 : Simulation du fonctionnement thermique pour le scénario 3 les 5 premières années

On peut constater que le scénario 1 se caractérise par une utilisation équilibrée du stockage représenté par le champ de sondes et la condition d'un puisage hivernal au moins égal à l'injection de chaleur estivale est satisfaite.

La quantité d'énergie qui serait à stocker chaque année en saison estivale s'établirait alors sous 1,2 GWh/an.

Le dimensionnement de la puissance à installer s'obtient dans les mêmes conditions que pour le scénario 1. Elle est estimée à 542 kW alors que le débit afférent pour un ΔT de 7°C est de 65 m³/h.

Nota : le commentaire proposé pour le scénario 1 relatif aux surpuissances reste valable. De même, l'énergie puisée annuellement dans le milieu naturel est négligeable.

Stockage	Puissance saisonnière moyenne		Débit saisonnier moyen	
	Hiver (kW _{GTH} /h)	Eté (kW _{GTH} /h)	Hiver (m³/h)	Eté (m³/h)
2018	31.4	-29.8	3.9	3.7
2019	127.5	-138.0	15.7	16.9
2020	227.5	-250.2	27.9	30.7
2021	354.2	-349.2	43.5	42.9
2022	353.9	-349.0	43.5	42.9

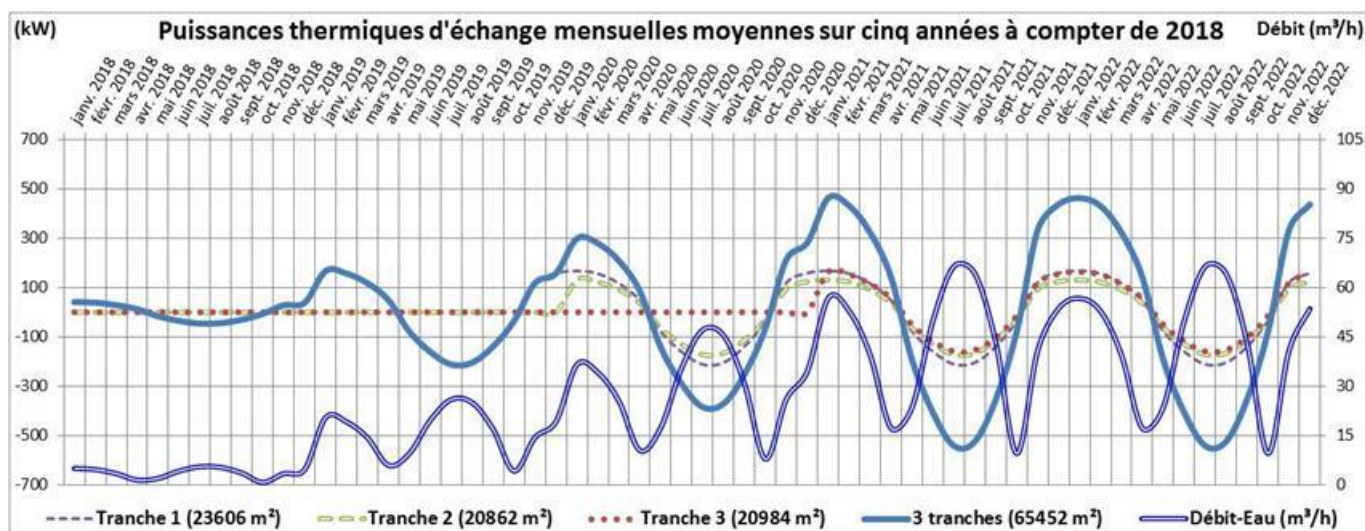


Figure 92 : Scénario 3 - Puissances d'échange thermique avec le champ de sondes et débits afférents

Le schéma en Figure 93 ci-dessous synthétise les flux énergétiques globaux pour le système envisagé pour le scénario 1, qui est axé sur un échange équilibré entre puisage hivernal et injection estivale obtenu en maintenant la température de l'eau dans le Puits Y sous 35 °C de manière à rester sur une température moyenne dans le stockage équivalente à celle des roches encaissantes. Ce point de fonctionnement suppose une optimisation du système, c'est-à-dire a minima une production de l'ECS à partir des excédents des climatisations.

Dans ces conditions, les estimations des consommations en énergie électrique nécessaires pour les pompes à chaleur sont les suivantes :

- Pour les pompes à chaleur en saison hivernale : 377 MWh
- Pour les pompes à chaleur en saison estivale : 241 MWh
- Pour les échanges thermiques avec le champ de sondes : 94 MWh (4 % de l'énergie)

Au total, la consommation d'énergie électrique s'établirait à environ 715 MWh, valeur pratiquement identique à celle du scénario 1 malgré un changement significatif des modes de consommation d'énergie électrique : le champ de sonde est plus favorable à la climatisation.

Cette énergie électrique est la seule énergie non-renouvelable employée par le système correspondant au scénario 1. Elle correspondrait à environ 23,4% de l'énergie finale/utile livrée.

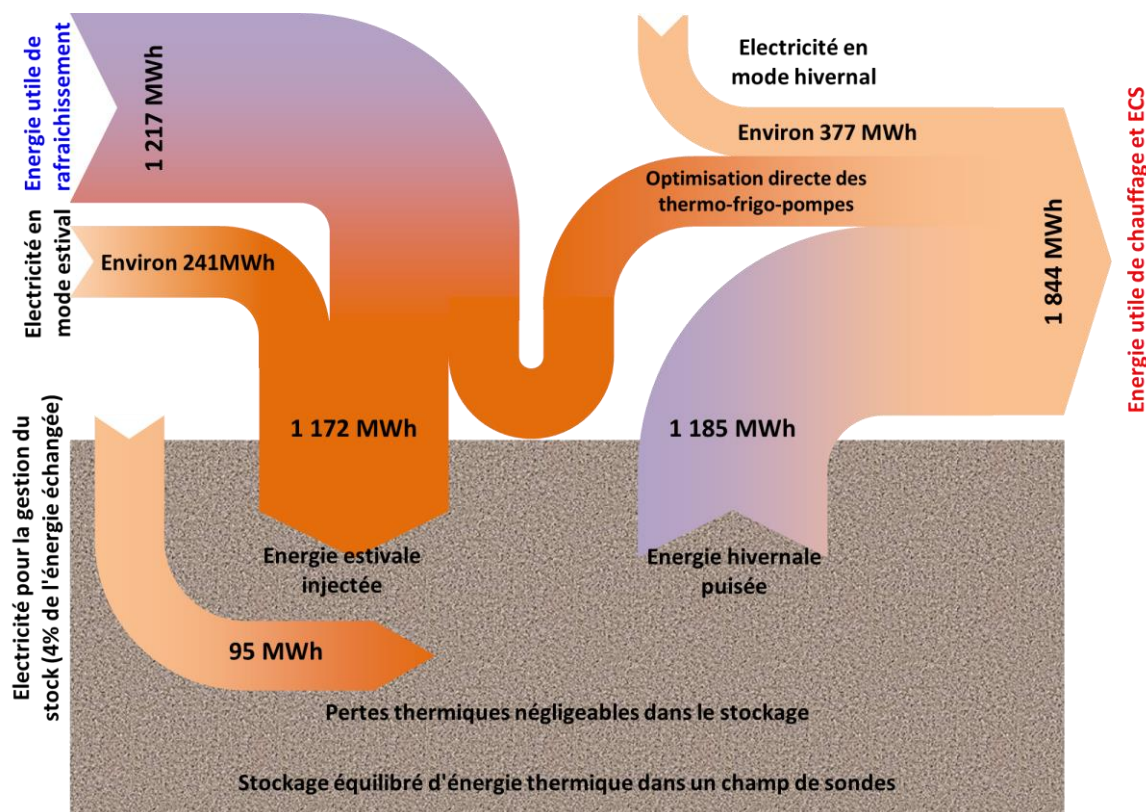


Figure 93 : Bilan énergétique indicatif pour le scénario 3 pour la cinquième année

Note de compréhension : Le schéma ci-dessus optimise les bénéfices pouvant résulter des capacités de stockage de court-terme en intersaison lorsqu'il y a alternance rapide entre demandes de chauffage de climatisation. Les périodes concernées sont avril/mai et octobre. Le concepteur pourra préférer l'exploitation du champ de sondes géothermiques à l'installation de certaines capacités tampon au niveau des machineries thermodynamiques, ce qui reste sans incidence sur le dimensionnement des équipements géothermiques. Ci-dessus, peuvent donc être à réévaluer les énergies échangées avec le champ de sondes géothermiques. Les quantités d'énergie thermique en jeu sont de l'ordre de 5 % de l'énergie stockée ou déstockée.

9.6.3. Eléments d'investissement spécifiques au scénario 3

Champ de sondes

Pour ce scénario, tous les composants sont comparables à ceux du scénario 1 hormis le champ de sondes géothermiques dont les paramètres de dimensionnement sont les suivants :

- La capacité thermique utile du champ de sondes est de 1,2 GWh
- La puissance d'échange thermique à installer est de l'ordre de 550 kW

Le dimensionnement estimatif s'obtient en faisant les hypothèses suivantes

- Ecart de température des roches durant un cycle complet ($\Delta T = T_{\max} - T_{\min}$) : 8°C
- Capacité thermique volumique des roches : 0,6 kWh/m³.K
- Profondeur des sondes : 100 m
- Puissance linéaire nominale des sondes dans le champ : 35 W/m

Avec ces hypothèses, pour obtenir une puissance thermique installée de 550 kW avec des sondes de 100 m de profondeur, et une capacité volumique de 35 W/m, il faut une longueur forée totale de 17 715 m, soit 158 sondes géothermiques.

La capacité thermique saisonnière de 1,2 GWh impose alors un volume de roches de 250 000 m³, ce qui représente près de quatre fois le volume du Puits Y pour une capacité thermique similaire. Si la profondeur des sondes est de 100 m, alors la surface mobilisée au sol par le champ de sondes est de 2 500 m².

L'agencement des 158 sondes sous la surface de 2 500 m² revient à un espacement entre les sondes de 4 m.

Les coûts standardisés issus des données statistiques (données 2012) conduisent à un investissement pour le champ de sondes estimé à 1,15 M€, soit 7,15 k€ par sonde.

Nota : La notion de surpuissance thermique peut être assez facilement perçue pour un champ de sonde. Dans le cas présent, il a été fait l'hypothèse d'une puissance spécifique de 35 W/m alors que, par exemple, un milieu naturel calcaire non karstique pourrait autoriser des puissances spécifiques jusqu'à 50 W/m. Pour un champ de sondes, le fait de pré-dimensionner avec 35 W/m apparaît comme une précaution allant dans le sens d'une garantie de performance en toutes circonstances, donc sans surconsommation d'énergie électrique.

Pompes à chaleur (pour mémoire)

Le coût d'approvisionnement des pompes à chaleurs peut être esquissé sur la base de celui d'une machinerie centralisée. En première approche, la puissance thermique installée à prévoir serait au maximum de l'ordre de 700 à 750 kW, en tenant compte d'une surpuissance pour éviter un appoint thermique. Cela représente une puissance électrique afférente des compresseurs de l'ordre 120 à 150 kW. Le coût d'approvisionnement indicatif pour de telles pompes à chaleur serait alors de l'ordre de 125 k€. Ce coût n'inclut pas le reste des équipements, notamment les échangeurs de chaleur.

10. Phase 2 : Synthèse technico-économique des trois scénarios

Nota : Les coûts ci-dessous sont fournis à titre indicatif n'étant pas l'objet de la mission du BRGM

	Scénario 1	Scénario 2	Scénario 3
Bilan thermique	MWh/an	MWh/an	MWh/an
Chauffage + ECS *			
Livré (énergie utile)	1 844	1 844	1 844
Puisé dans le stockage	1 280	536	1 185
Climatisation			
Livré (énergie utile)	1 217	1 217	1 217
Injecté dans le stockage	1 244		1 172
Rejets aérothermiques		3 652	
Solaire thermique			
Capté		4 527	
Direct chauffage + ECS		1 308	
Direct climatisation		2 435	
Stocké		784	
Gestion du stockage			
Bilan / Pertes thermiques	≈ 0	238	≈ 0
Bilan électrique	MWh/an	MWh/an	MWh/an
Saison hivernale	270	33	377
Saison estivale	340	122	241
Gestion du stockage	100	53	95
Dépense électrique totale	710	208	713
Investissements spécifiques	k€ HT	k€ HT	k€ HT
Équipement du Puits Y	1 500	1 500	
Champ de sondes			1 150
Champs solaires		1 800	
Machineries à sorption		770	
Machineries pompe à chaleur	500		500
Réseau primaire	300	300	300
Total	2 300	4 370	1 950
Ingénierie (7%)	161	306	137

Figure 94 : Tableau de synthèse technico-économique des trois scénarios

* Par simplification, l'ECS des scénarios 1 à 3 est intégralement présenté avec le chauffage

Nota : Les coûts ci-dessous sont fournis à titre indicatif n'étant pas l'objet de la mission du BRGM

	Scénario 1	Scénario 2	Scénario 3	Classique
Bilan thermique	MWh/an	MWh/an	MWh/an	MWh/an
Chauffage + ECS *				
Livré (énergie utile)	1 844	1 844	1 844	1 844
Puisé dans le stockage	1 280	536	1 185	
Gaz consommé				1 970
Climatisation				
Livré (énergie utile)	1 217	1 217	1 217	1 217
Injecté dans le stockage	1 244		1 172	
Rejets aérothermiques		3 652		1 700
Solaire thermique				
Capté		4 527		
Direct chauffage + ECS		1 308		
Direct climatisation		2 435		
Stocké		784		
Gestion du stockage				
Bilan / Pertes thermiques	≈ 0	238	≈ 0	
Total thermique non renouvelable				1 970
Bilan électrique	MWh/an	MWh/an	MWh/an	MWh/an
Saison hivernale	270	33	377	
Saison estivale	340	122	241	485
Gestion du stockage	100	53	95	
Dépense électrique totale	710	208	713	485
Investissements spécifiques	k€ HT	k€ HT	k€ HT	k€ HT
Equipement du Puits Y	1 500	1 500		
Champ de sondes			1 150	
Champs solaires		1 800		
Machineries à sorption		770		
Machineries pompe à chaleur	500		500	300
Réseau primaire	300	300	300	500
Chaufferie gaz centralisée				200
Sous-stations spécifiques				200
Total	2 300	4 370	1 950	1 200
Ingénierie (7%)	161	306	137	84

Figure 95 : Tableau technico-économique comparatif des trois scénarios et de la solution classique

* Par simplification, l'ECS des scénarios 1 à 3 est intégralement présenté avec le chauffage comme pour la solution classique

10.1. DISCUSSION : APPOINT THERMIQUE POUR LA CLIMATISATION

10.1.1. Présentation : Appoints centralisés et hybridation

Les scénarios 1 à 3 examinés ci-dessus font l'hypothèse qu'une fraction des locaux est faiblement climatisée, c'est à dire que ces locaux ne bénéficient que d'un rafraîchissement. Le but est de garantir un équilibre entre les puisages hivernaux de chaleur et les injections estivales de chaleur. Il a donc été considéré que la demande globale en énergie frigorifique était abaissée de 1 758 MWh à 1 217 MWh. Ainsi, par rapport à l'étude BG, la quantité annuelle d'énergie frigorifique à l'échelle de la ZA Morandat est abaissée d'environ 540 MWh/an.

	Demande thermique spécifique du bâti			Froid selon étude BG (kWh/m².an)
	Chauffage (kWh/m².an)	ECS (kWh/m².an)	Froid (kWh/m².an)	
Tertiaire rénové	40	5	50	50
Entreposage	40	0	0	0
Centre-Multi-Culturel	40	5	5	50
Hôtellerie	20	20	25	25
Tertiaire-Rafrachi	20	5	5	25
Tertiaire neuf	20	5	25	25
Hôtel Entreprises	40	5	25	25

	Demande thermique annuelle utile du bâti			Froid selon étude BG (MWh/an)
	Chauffage (MWh/an)	ECS (MWh/an)	Froid (MWh/an)	
Tertiaire rénové	42	5	53	53
Entreposage	26	0	0	0
Centre-Multi-Culturel	178	22	22	222
Hôtellerie	70	70	88	88
Tertiaire-Rafrachi	341	85	85	426
Tertiaire neuf	740	185	925	925
Hôtel Entreprises	72	9	45	45

Afin de satisfaire l'ensemble des besoins si une optimisation de la demande frigorifique n'était pas consentie, il faudrait installer des appoints frigorifiques.

Considérant que les scénarios 1 à 3 exploitent un réseau d'énergie thermique, il pourrait être efficace d'implanter un appoint frigorifique centralisé même si les machineries thermodynamiques sont décentralisées. C'est ce type de système hybride qui, par exemple, a été retenu pour le récent réseau de chaleur géothermique implanté au Fort d'Issy, les besoins en chauffage et ECS étant ici abondés par une petite chaufferie gaz.

Dans un tel cas, le rôle de l'appoint est d'ajuster la température de départ réseau afin de diminuer le travail à fournir par les machineries thermodynamiques décentralisées. En ce qui concerne la ZA Morandat, la demande en appoint se situe en période estivale et c'est donc principalement un abaissement de la température de départ réseau qui serait requis.

10.1.2. Appoint frigorifique par machinerie centralisée

En première approximation, si toute la ZA Morandat devait être rafraîchie selon les estimations proposées par l'étude BG, il faudrait injecter dans le départ réseau l'équivalent de 540 MWh d'énergie frigorifique, cela essentiellement en période estivale.

Cette injection dans le départ réseau présente l'intérêt de laisser pratiquement inchangées les machineries décentralisées au niveau des sous-stations, l'atteinte de l'objectif énergétique résultant de l'optimisation de la température arrivant à la sous-station.

Les deux options thermodynamiques centralisées envisageables sont alors :

- **Machinerie thermodynamique à compression mécanique**

Dans ce cas de figure, la puissance frigorifique, qui serait nécessaire, est de l'ordre de 220 kW, si la machinerie fonctionne 75 % du temps lors des périodes de pointe, et de 340 kW si la machinerie ne fonctionne que 50 % du temps.

En termes de rejets de chaleur, les puissances thermiques seront respectivement de l'ordre de 320 kW et de 500 kW, et les énergies rejetées seront de l'ordre de 790 MWh quel que soit le temps de fonctionnement. La consommation d'énergie électrique serait alors de l'ordre de 250 MWh. Le rejet thermique est à envisager via des équipements aérothermiques.

- **Machinerie thermodynamique à sorption**

Par analogie au scénario 2, l'appoint par une machine à sorption s'envisage d'abord sur base d'une ressource solaire thermique ; cette solution étant facilement transposable.

On supposera en première approche que le COP/EER de la machine à sorption est de l'ordre de 0,5. Cela implique une ressource thermique de 1 080 MWh pour produire une énergie frigorifique de 540 MWh. Le rejet thermique à envisager via des équipements aérothermiques est alors de l'ordre de 1 620 MWh. L'énergie électrique consommée par la machinerie est évaluée à 10 % de l'énergie frigorifique utile, soit 54 MWh.

Pour produire l'énergie thermique de pilotage de la machinerie à sorption, on reprendra les mêmes hypothèses que pour le scénario 2 et la surface totale de panneaux solaires à prévoir sur le secteur de la ZA Morandat serait alors de l'ordre de 1 720 m².

Solaire annuel incident :	1 572	kWh/m ² .an
Fraction solaire captée:	40,0 %	du solaire incident
Fraction solaire captée:	629	kWh/m ² .an
Energie solaire totale à capter :	1 080	MWh/an
Surface de panneaux à prévoir :	1 720	m ²

Les deux options ci-dessus permettraient de satisfaire l'intégralité de la demande en climatisation de la ZA Morandat, telle qu'elle a été envisagée par le bureau d'étude BG. Les fonctionnements envisagés pour les scénarios 1 et 3 restent alors identiques à ce qui a été exprimé plus avant dans le présent rapport (Figure 96) si ce n'est que **l'appoint frigorifique à implanter est réversible et permet également d'apporter, si nécessaire, un appoint de chaleur pour le chauffage et pour l'ECS.**

En ce qui concerne le scénario 2, l'appoint frigorifique représente simplement la capacité supplémentaire qu'il faudrait installer pour satisfaire les besoins en climatisation ; les besoins thermiques pour le chauffage utilisant le stockage dans le Puits Y pouvant alors être partiellement réduits du fait d'une capacité solaire plus abondante en période hivernale.

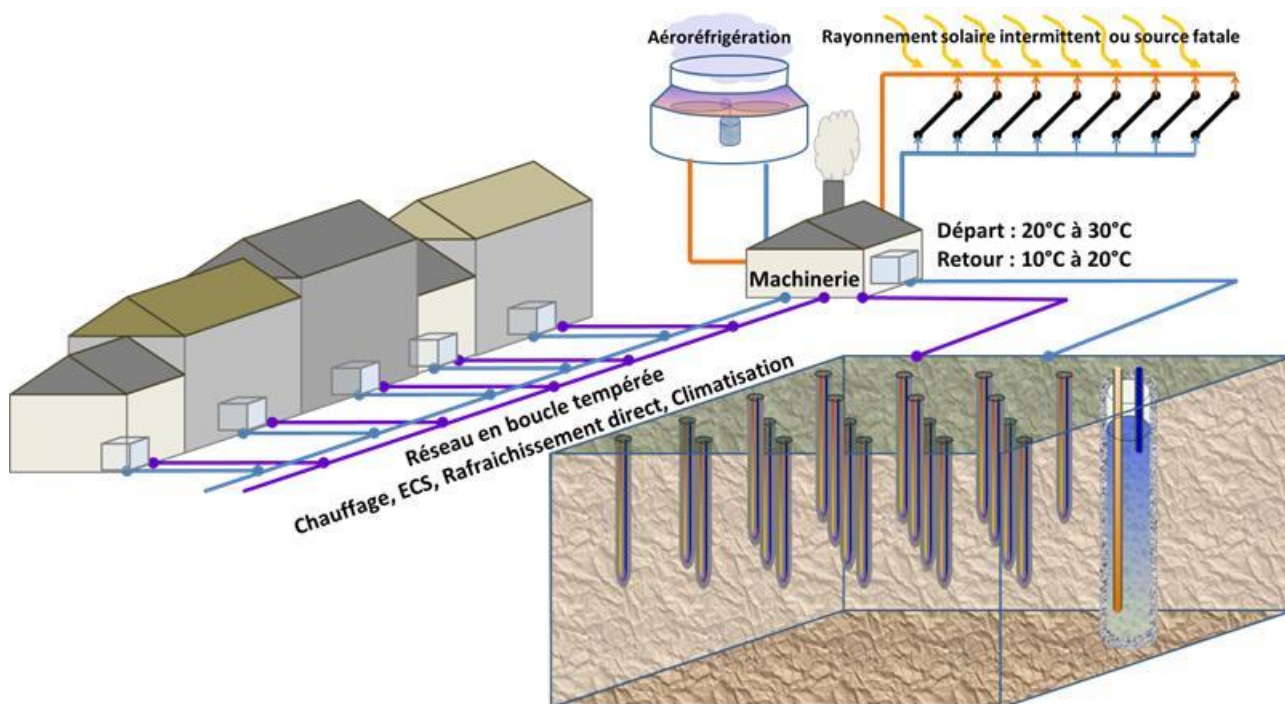


Figure 96 : Représentation schématisque des scénarios 1 et 3 en présence d'un appoint solaire thermique et frigorifique par machine à sorption (sur solaire thermique)

Nota : La Figure 96 ci-dessus illustre le fait qu'un appoint frigorifique peut être implanté sous la forme d'une machinerie à sorption centralisée pilotée par du solaire thermique.

En remplacement du solaire thermique, il reste évidemment possible d'exploiter une éventuelle chaleur fatale si elle se révèle disponible.

Important : Dans l'hypothèse où de l'énergie fatale serait disponible en quantités suffisantes, l'intérêt d'exploiter le Puits Y ne se justifie que lorsque la disponibilité des sources fatale n'est pas continue.

10.1.3. Synthèse comparative des trois scénarios et de l'Appoint centralisé

Nota : Les coûts ci-dessous sont fournis à titre indicatif n'étant pas l'objet de la mission du BRGM

	Scénario 1	Scénario 2	Scénario 3	Appoint
Bilan thermique	MWh/an	MWh/an	MWh/an	MWh/an
Chauffage + ECS *				
Livré (énergie utile)	1 844	1 844	1 844	
Puisé dans le stockage	1 280	536	1 185	
Climatisation				
Livré (énergie utile)	1 217	1 217	1 217	540
Injecté dans le stockage	1 244		1 172	
Rejets aérothermiques		3 652		1 620
Solaire thermique				
Capté		4 527		2 700
Direct chauffage + ECS		1 308		
Direct climatisation		2 435		1 080
Stocké		784		
Gestion du stockage				
Bilan / Pertes thermiques	≈ 0	238	≈ 0	
Bilan électrique	MWh/an	MWh/an	MWh/an	MWh/an
Saison hivernale	270	33	377	
Saison estivale	340	122	241	54
Gestion du stockage	100	53	95	
Dépense électrique totale	710	208	713	54
Investissements spécifiques	k€ HT	k€ HT	k€ HT	k€ HT
Equipement du Puits Y	1 500	1 500		
Champ de sondes			1 150	
Champs solaires		1 800		430
Machineries à sorption		770		340
Machineries pompe à chaleur	500		500	
Réseau primaire	300	300	300	
Chaufferie gaz centralisée				
Sous-stations spécifiques				
Total	2 300	4 370	1 950	770
Ingénierie (7%)	161	306	137	54

Figure 97 : Tableau technico-économique comparatif des trois scénarios et de l'appoint

* Par simplification, l'ECS des scénarios 1 à 3 est intégralement présenté avec le chauffage

10.1.4. Appoint par approvisionnement d'énergie fatale frigorifique

Pour être complet, l'hypothèse d'une disponibilité d'énergie fatale sous forme d'énergie frigorifique doit également être citée.

D'une manière générale, cette hypothèse s'applique à tout système de rafraîchissement et est subordonnée à la disponibilité d'une ressource abondante à température très basse, voire négative. Elle se traduit alors par une baisse de la demande en rafraîchissement.

Pour les scénarios envisagés au niveau de la ZA Morandat, cette hypothèse pourrait donner lieu à une solution hybride exploitant le stockage géologique, ce qui n'est applicable qu'aux scénarios 1 et 3 produisant le rafraîchissement à partir du stockage géologique.

A titre d'illustration, on peut considérer que l'énergie de fonte de la glace représente une énergie de l'ordre de 93 kWh par tonne de glace (ou par tonne d'eau), ce qui représenterait une énergie frigorifique de 1,86 MWh par conteneur de 20 tonnes de glace.

Avec cette hypothèse, il faudrait de l'ordre de 290 conteneurs pour représenter une énergie frigorifique d'appoint (540 MWh) permettant de satisfaire l'ensemble des besoins en climatisation de la ZA Morandat tels qu'envisagés par l'étude BG.

Sur le principe, un conteneur spécifique serait à concevoir pour transporter l'énergie frigorifique et l'échanger :

- Soit pour un usage direct, moyennant les seuls équipements de surface, ce qui, étant à opérer préférentiellement en période estivale, pourrait typiquement représenter 3 conteneurs par jour pour la période la plus chaude.
- Soit pour du stockage transitoire dans les équipements souterrains, ce qui, un stockage souterrain pouvant être de grande capacité, pourrait s'envisager en un nombre restreint d'opérations selon une technologie restant à adapter :

Pour le scénario 1, qui exploite le Puits Y, l'injection de frigories paraît techniquement envisageable, soit par utilisation du circuit hydraulique, soit en réutilisant les moyens de treuillage pour lesquels le Puits Y avait été conçu. Pour cela, il peut s'agir de concevoir un conteneur étanche spécifique dans lequel sont emprisonnées 20 tonnes d'eau/glace (ou de tout autre matériaux à changement de phase). Le conteneur peut alors être descendu dans le Puits Y à l'aide des moyens de treuillage existant dont la capacité est de 40 tonnes. Le conteneur ne serait probablement pas à descendre profondément vu les phénomènes de convection s'organisant naturellement dans le Puits. La contrainte est alors de s'assurer que les moyens hydrauliques mis en place pour l'exploitation du Puits Y ne constituent pas des obstacles à la descente du conteneur. On rappellera que cette contrainte avait été identifiée lors de la première phase d'analyse afin de préserver la possibilité d'employer le Puits Y pour du stockage gravitaire d'énergie, au moins à titre expérimental.

Pour le scénario 3, exploitant un champ de sondes, seule l'utilisation du circuit hydraulique paraît envisageable pour injecter les frigories.

Nota : L'identification de sources fatales de frigories ne relève pas de la mission du BRGM. Néanmoins, la littérature mentionne les deux terminaux méthaniers de Fos-sur-Mer vers lesquels sont dirigés les navires méthaniers de transport de gaz naturel liquéfié (GNL) à une température entre -140 °C et -160°C. Il semblerait que le processus de regazéification actuel ne récupère pas toute l'énergie frigorifique disponible mais cela n'a pas été vérifié.

Pour ces deux terminaux, un transport vers la ZA Morandat, par voie ferroviaire, de conteneurs spécifiques comme celui évoqué ci-dessus paraît envisageable mais l'analyse de la faisabilité reste en dehors des objectifs de la présente étude.

11. Synthèse résumée des résultats de l'étude

11.1. DESCRIPTIF SOMMAIRE

Le programme de construction prévu pour la ZA Morandat prévoit l'utilisation du Puits Y dans le système énergétique devant assurer le confort thermique des locaux, lesquels devraient représenter une surface totale de l'ordre de 65 000 m² de SHON.

Une étude de préfaisabilité technique a été menée par le BRGM afin de vérifier dans quelles conditions ledit Puits Y pouvait être employé.

Cette étude a montré que, si le Puits Y constitue une opportunité énergétique, des contraintes afférentes à son équipement et à une exploitation énergétique devaient être prises en considération, notamment du fait que le Puits Y représente un volume captif d'environ 63 000 m³ d'eau et que sa capacité énergétique indicative, en prenant en considération les roches du proche puits, représente 1,3 GWh lorsque le ΔT de 15 °C ; ce qui peut être considéré comme représentatif d'un mode d'exploitation réaliste tel que décrit ci-dessous.

A l'issue de l'étude et après les concertations avec le Comité de Pilotage, deux modes d'exploitation du Puits Y ont été formulés (**scénario 1** et **scénario 2**) ainsi qu'un scénario technico-économique de référence exploitant un champ de sondes géothermiques (**Scénario 3**) :

- 1) **Mode tempéré** – Ce mode (**scénario 1**) correspond au raccordement du Puits Y à un réseau de distribution d'énergie dit en "boucle tempérée", ce qui signifie que la température de l'eau reste globalement inférieure à environ 30 °C.

Dans ce cas, des pompes à chaleur sont distribuées le long du réseau d'énergie afin de produire le niveau de la température requis pour satisfaire les besoins des usagers en fonction de la période de l'année.

Du fait d'un fonctionnement articulé autour du réservoir d'énergie que constitue le Puits Y, il y a quasi obligation d'assurer chaque année un équilibre entre les injections en période estivale de la chaleur rejetée par les dispositifs de rafraîchissement et les puisages de chaleur en période hivernale pour assurer le chauffage des locaux. La limite saisonnière pour l'énergie respectivement injectée ou puisée serait alors de 1,3 GWh comme indiqué ci-dessus.

Pour cette raison, la demande en climatisation telle qu'estimée macroscopiquement par le bureau d'étude BG, ne peut être prise en compte que pour environ 70 %. Les deux options sont d'assurer ce service par des moyens ne recourant pas au Puits Y ou d'améliorer l'efficacité énergétique pour réduire de 30 % de la demande, ce qui paraît envisageable mais doit être validé.

Le fonctionnement de ce mode est saisonnier et la température du réseau de distribution fluctue avec la température dans le Puits Y. Ainsi, l'écart de la température est typiquement de 15 °C entre la fin de la saison de chauffage, se caractérisant par un abaissement vers 15 °C à 18°C de la température dans le Puits Y et la fin de la saison estivale, se caractérisant par une remontée vers de la température de 30 °C à 33°C.

Un tel système peut être complété par un appoint centralisé dont le rôle est d'adapter la température de départ réseau, c'est-à-dire de la boucle primaire en amont des sous-stations. En saison hivernale, l'appoint correspond à un préchauffage de quelques degrés Celsius. En saison estivale, l'appoint correspond à un abaissement de quelques degrés Celsius.

Solution de repli pour le mode tempéré - Compte tenu des contraintes d'équipement et d'exploitation d'un système énergétique utilisant le Puits Y, une solution de repli a été étudiée (**scénario 3**) qui remplace le Puits Y par un ou plusieurs champs de sondes géothermiques, le nombre indicatif de sondes s'établissant à 160 si leur profondeur unitaire est de 100 mètres. Il est à noter que cette solution de repli peut intervenir en substitution totale ou partielle du Puits Y mais qu'une telle orientation relève des choix à opérer lors des études de détail. Il en est de même de la baisse de 30 % de la demande globale en rafraîchissement.

- 2) **Mode chaud** – Ce mode (**scénario 2**) correspond au raccordement du Puits Y à un réseau d'énergie thermique transportant de l'énergie thermique autour de 50 °C en toutes saisons, cette énergie étant constituée soit des surplus d'énergie thermique produite par des panneaux solaires thermiques et devant être stockée dans le Puits Y, soit par de l'énergie thermique déstockée du Puits Y et servant au chauffage des locaux.

Dans ce mode de fonctionnement, le rafraîchissement des locaux résulte exclusivement de moyens de climatisation solaire employant des pompes à chaleur à sorption, ces moyens étant répartis dans les bâtiments ou groupes de bâtiments. Les panneaux solaires alimentant les moyens de climatisation à sorption sont dimensionnés pour satisfaire la pointe de demande en juillet ou août et, malgré les stockages tampon court terme, la production d'énergie thermique est globalement supérieure aux besoins des dispositifs de rafraîchissement et les excédents transportés par le réseau d'énergie pour être stockés dans le Puits Y.

L'étude de préfaisabilité a montré qu'il pouvait être préférable de ne pas sur-stocker dans le Puits Y car cela pourrait être synonyme d'une augmentation des pertes thermiques, lesquelles s'accompagneraient alors de dépenses de pompage inutiles. Pour cette raison, l'étude de préfaisabilité recommande une plage d'utilisation du Puits Y comprise entre 40 °C et 50 °C, plage qui permet d'utiliser indifféremment les techniques de chauffage par plancher chauffant ou par ventilo-convecteur.

Dans ce mode de fonctionnement, le chauffage se fait en usage direct, c'est-à-dire sans nécessiter de pompe à chaleur. L'énergie utile résulte d'une combinaison de l'énergie solaire directement utilisable pour approximativement 60 % à sur la durée de la saison de chauffage et de l'énergie déstockée du Puits Y pour le reste, cette énergie étant en fait une énergie solaire indirecte.

Solution de repli pour le mode chaud – A proprement parler, il ne s'agit pas d'une solution de repli mais d'une solution alternative.

En effet, de possibles opportunités locales pourraient se traduire en ressources en énergies thermiques fatales que pourraient céder des industriels.

La ressource solaire pourrait alors être revue à la baisse, partiellement ou en totalité. Toutefois à ce jour, aucune information n'est suffisante, qui permettrait d'esquisser un scénario. Néanmoins, un rôle pourrait être conservé pour le Puits Y s'il était avéré que la disponibilité des sources fatales n'était pas garantie.

Dans cette hypothèse, la fonction du Puits Y pourrait être similaire à celle envisagée en combinaison avec une ressource thermique exclusivement solaire.

11.2. BILAN SYNTHETIQUE DES TROIS SCENARIOS

11.2.1. Demande thermique du bâti et phasage des constructions

Ni le phasage des constructions, ni d'ailleurs l'allotissement, n'était encore établi lors de l'étude et il a donc été supposé un étalement indicatif en trois phases sur trois années. La progression esquissée pour l'étude de pré faisabilité technique est alors la suivante :

	Tranche 1	Tranche 2	Tranche 3	Totaux
Tertiaire rénové	1 060	0	0	1 060
Entreposage	640	0	0	640
Centre-Multi-Culturel	0	0	4 440	4 440
Hôtellerie	0	0	3 500	3 500
Tertiaire-neuf peu climatisé	6 702	6 954	3 375	17 031
Tertiaire neuf climatisé	13 404	13 908	9 669	36 981
Hôtel-Entreprises	1 800	0	0	1 800
Totaux	23 606	20 862	20 984	65 452

Le **Scénario 1** nécessite l'équilibrage des énergies injectées et puisées dans le Puits Y. Pour cette raison, il est supposé en base que la demande cumulée en climatisation était, pour les trois scénarios, abaissée à 1 217 MWh/an au lieu de 1 758 MWh/an, soit l'équivalent de 540 MWh/an devant relever soit d'une amélioration de la performance énergétique, soit d'autres moyens de production.

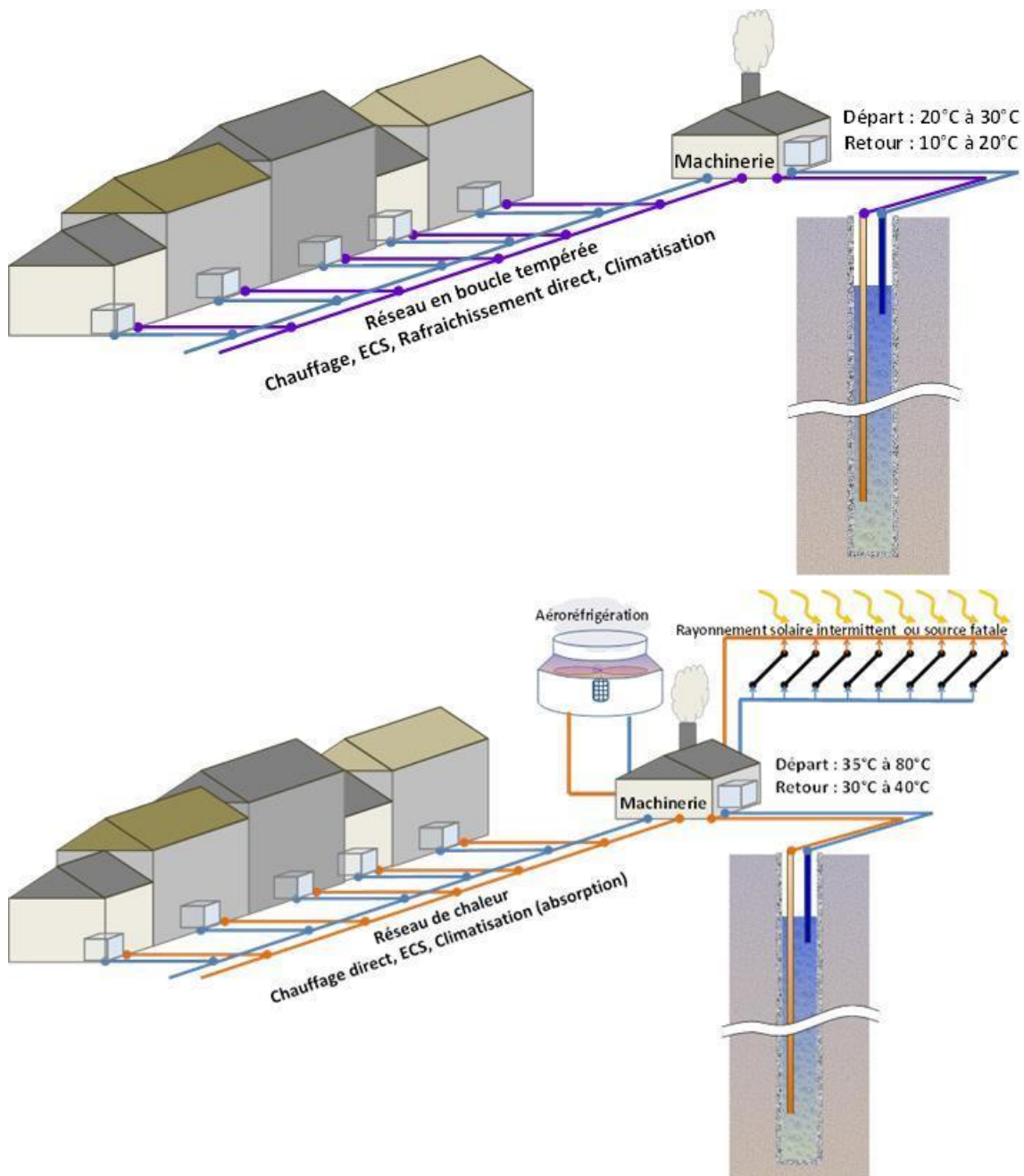
Les tableaux ci-dessous synthétisent les demandes qui sont exprimées en énergie utile/finale. On notera qu'une demande en ECS a été systématiquement ajoutée vis-à-vis de l'étude BG ; ce qui est favorable à l'équilibrage du Puits Y.

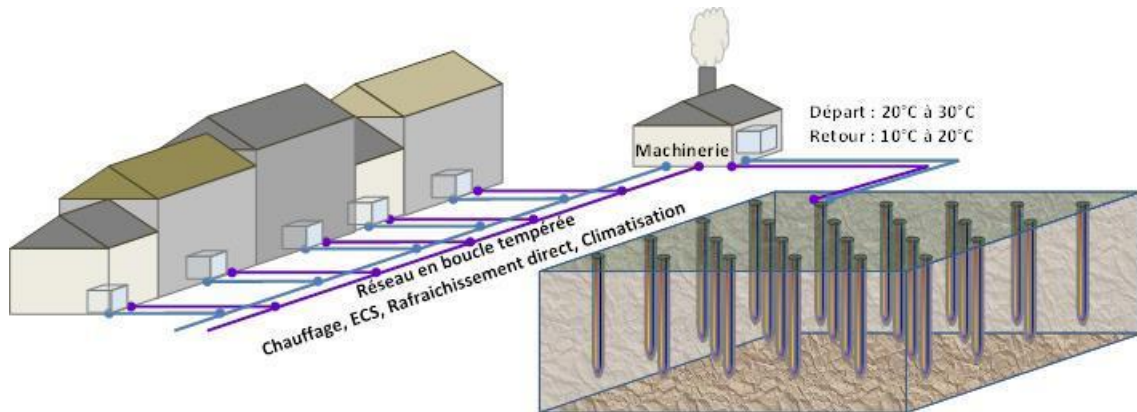
	Demande thermique spécifique utile du bâti			Froid selon étude BG (kWh/m².an)
	Chauffage (kWh/m².an)	ECS (kWh/m².an)	Froid (kWh/m².an)	
Tertiaire rénové	40	5	50	50
Entreposage	40	0	0	0
Centre-Multi-Culturel	40	5	5	50
Hôtellerie	20	20	25	25
Tertiaire-Rafricaïchi	20	5	5	25
Tertiaire neuf	20	5	25	25
Hôtel Entreprises	40	5	25	25

Avec les conditions ci-dessus, en fin de programme de construction les demandes thermiques annuelles cumulées seraient les suivantes :

	Demande thermique utile du bâti			Froid selon étude BG (MWh/.an)
	Chauffage (MWh/an)	ECS (MWh/an)	Froid (MWh/.an)	
Tertiaire rénové	42	5	53	53
Entreposage	26	0	0	0
Centre-Multi-Culturel	178	22	22	222
Hôtellerie	70	70	88	88
Tertiaire-Rafricaïchi	341	85	85	426
Tertiaire neuf	740	185	925	925
Hôtel Entreprises	72	9	45	45

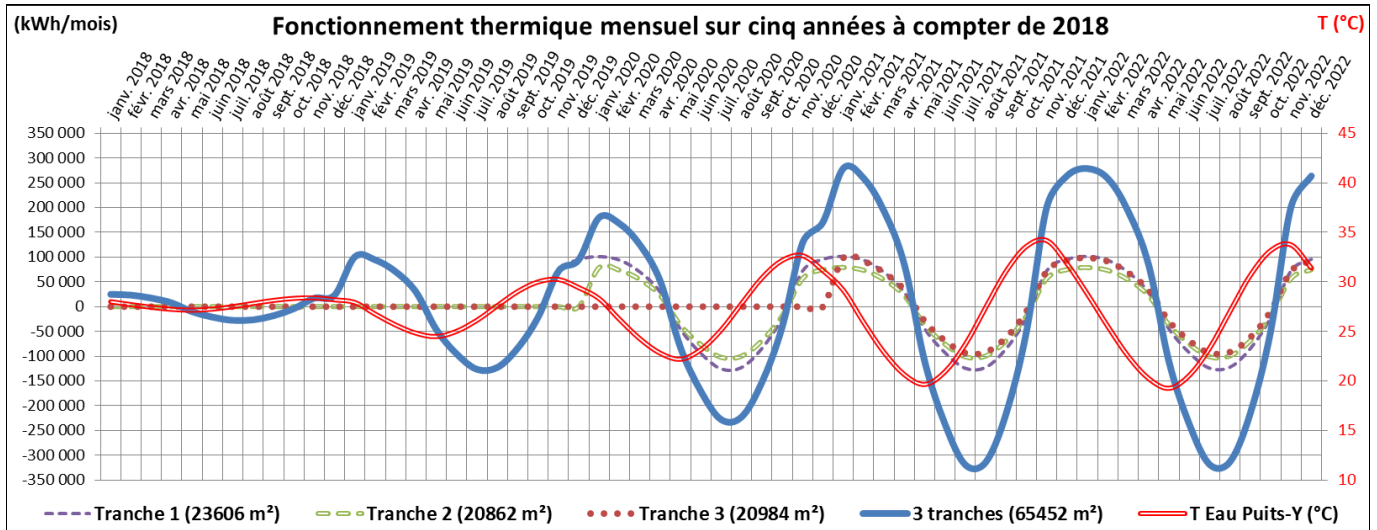
11.2.2. Représentations schématisque des trois Scénarios, respectivement 1, 2 et 3

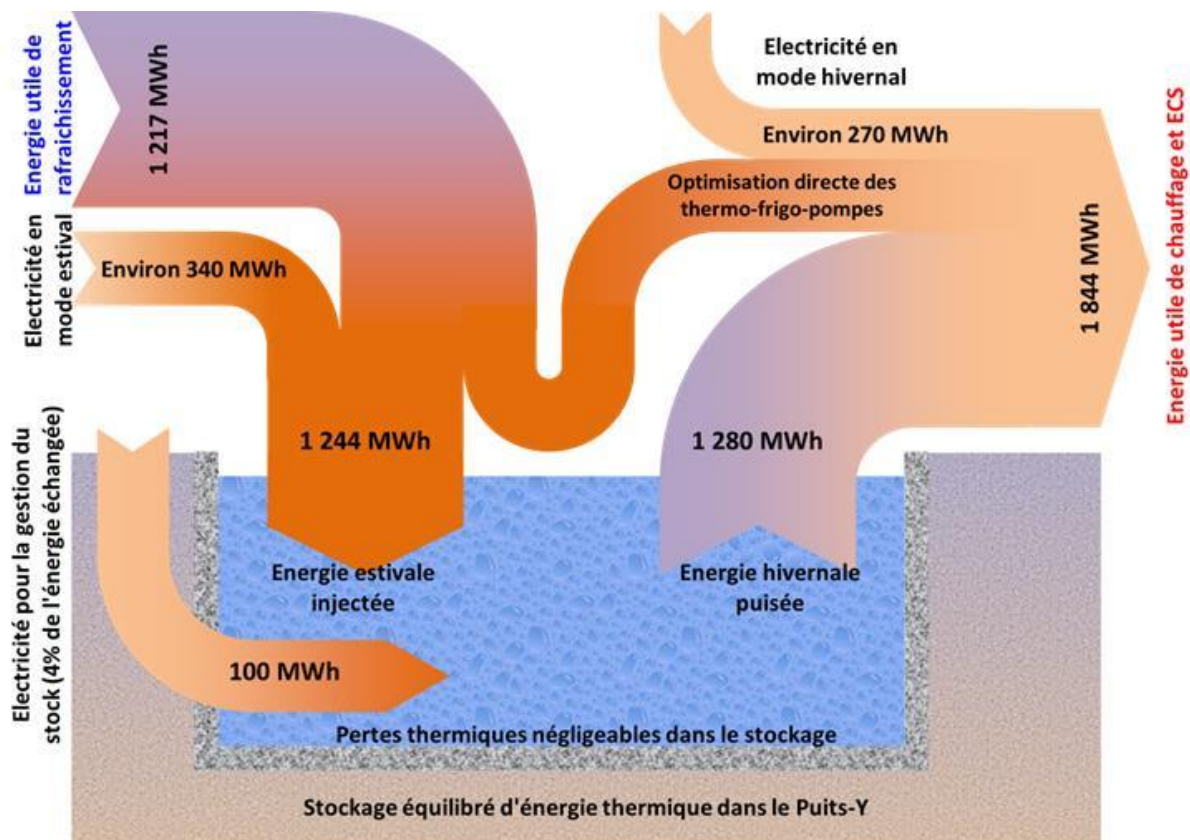




11.2.3. Bilans estimatifs pour le scénario 1 (pas de temps mensuel)

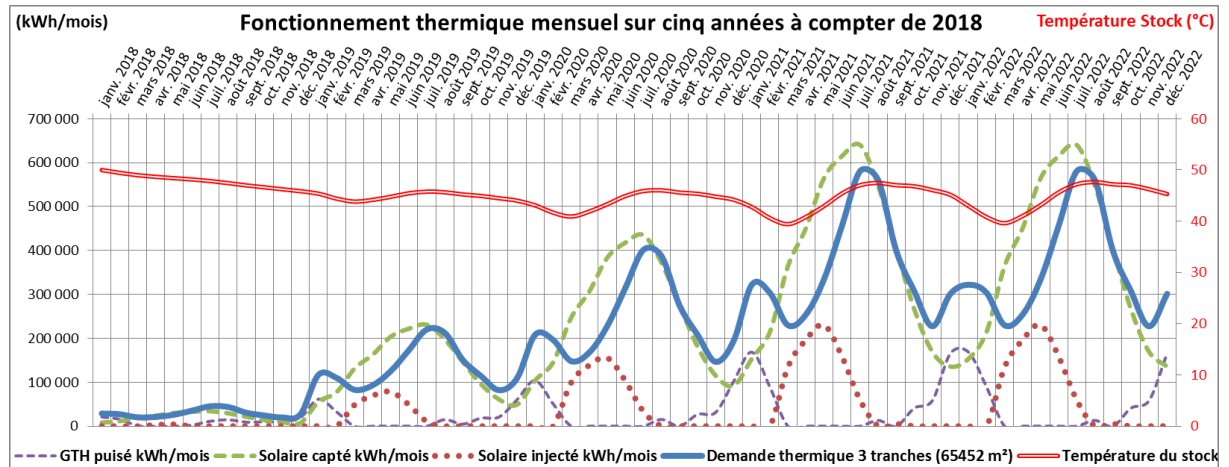
Etats saisonniers des stocks thermiques	Energie échangée		Puissance saisonnière moyenne	
	Puisage hivernal (MWh/an)	Injection estivale (MWh/an)	Hiver (kW _{GTH} /h)	Hiver (kW _{GTH} /h)
2018	113.8	-107.3	34.0	34.0
2019	462.0	-495.6	138.0	138.0
2020	824.4	-897.3	246.2	246.2
2021	1 282.9	-1 247.7	383.2	383.2
2022	1 280.3	-1 244.3	382.4	382.4

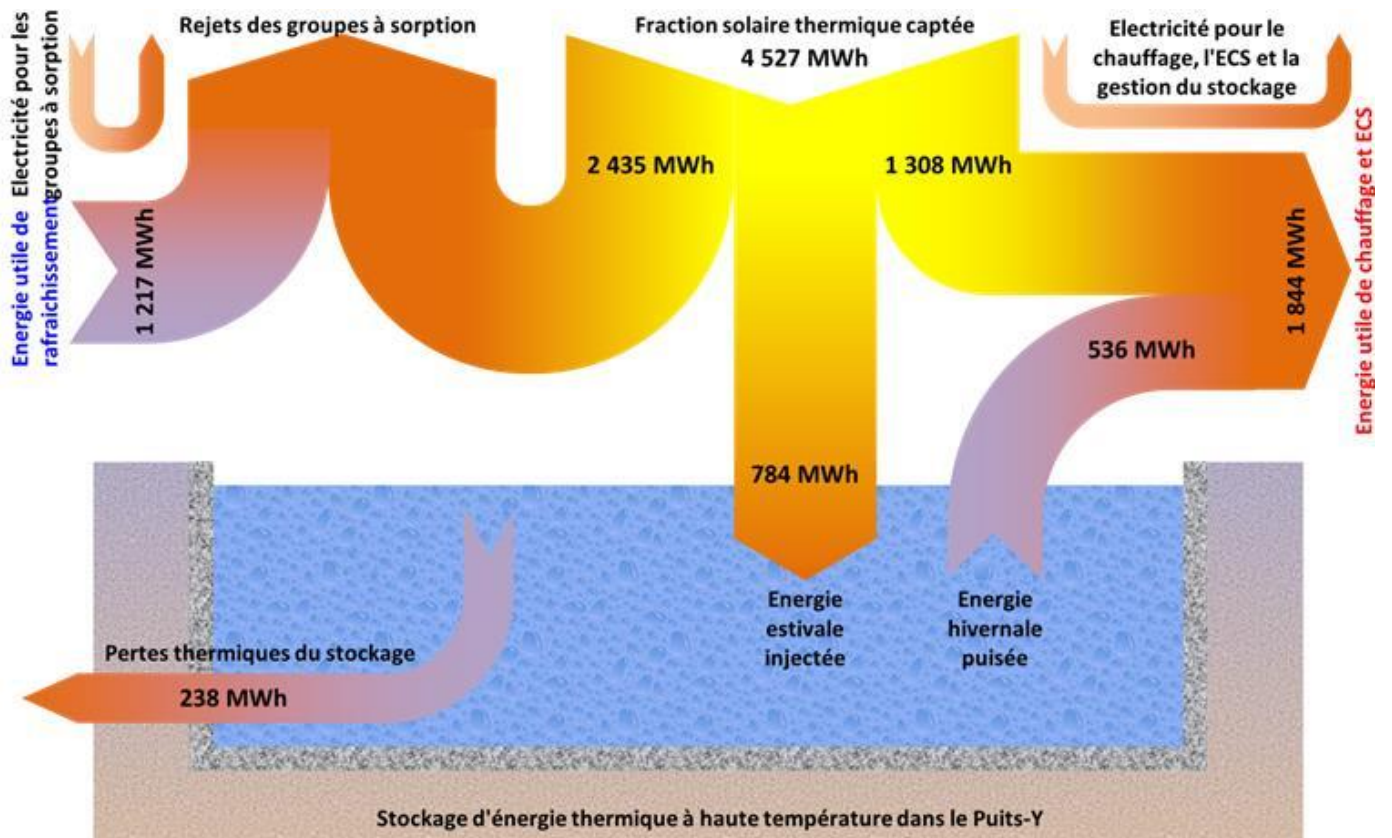




11.2.4. Bilans estimatifs pour le scénario 2 (pas de temps mensuel)

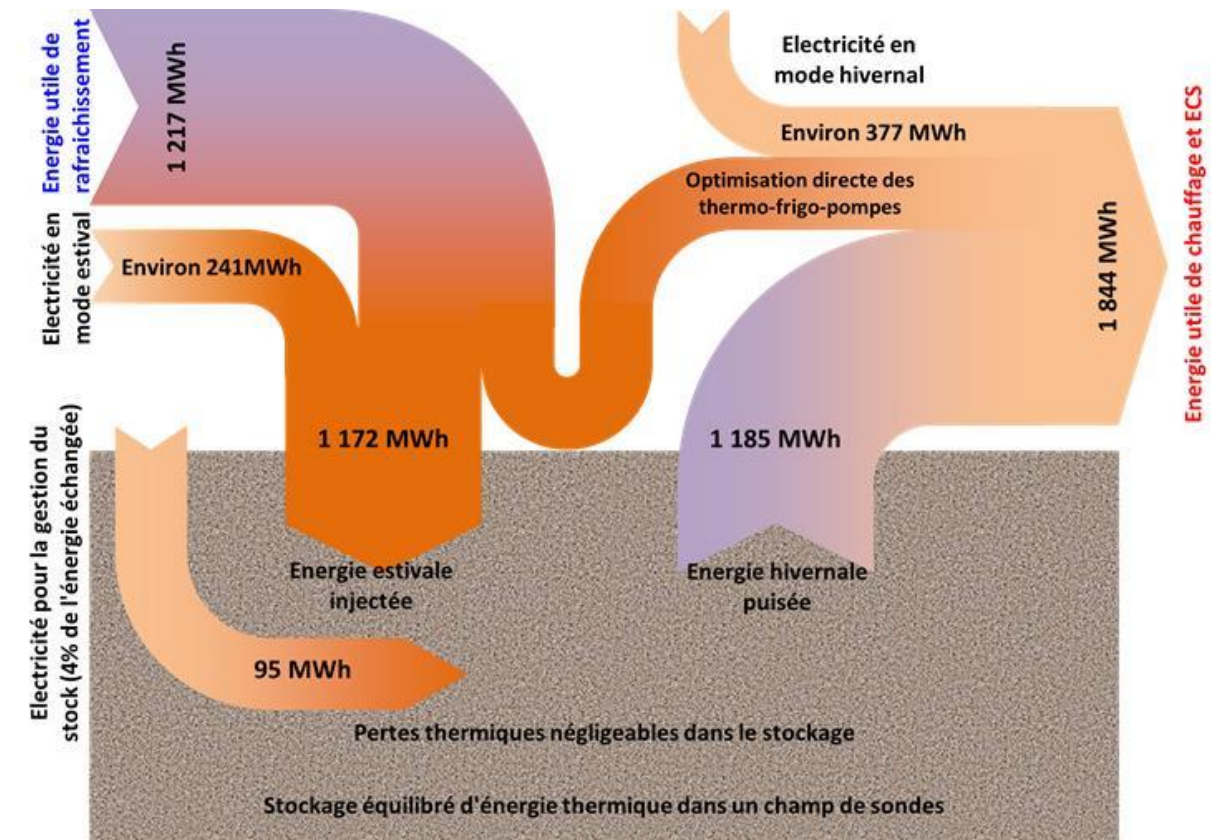
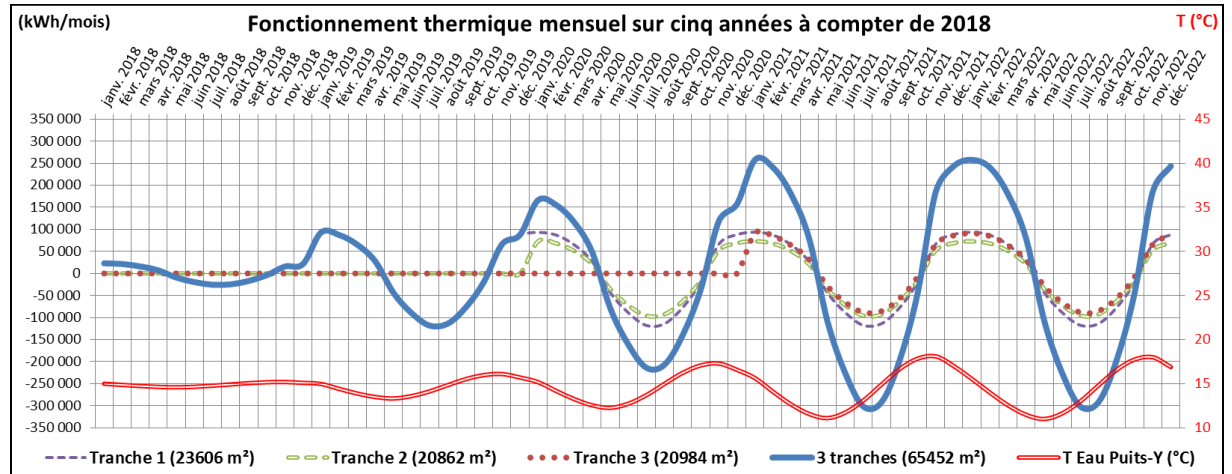
Etats saisonniers des stocks thermiques	Energie échangée avec le Puits Y		Energie solaire thermique	
	Puisage hivernal (MWh/an)	Injection estivale (MWh/an)	Usage direct (MWh/an)	Capté (MWh/an)
2018	115.3	7.1	235.0	242.1
2019	213.7	256.3	1 376.4	1 632.8
2020	330.8	529.9	2 545.8	3 075.8
2021	536.0	784.0	3 743.2	4 527.2
2022	536.0	784.0	3 743.2	4 527.2





11.2.5. Bilans estimatifs pour le scénario 3 (pas de temps mensuel)

Etats saisonniers des stocks thermiques	Energie échangée		Puissance saisonnière moyenne	
	Puisage hivernal (MWh/an)	Injection estivale (MWh/an)	Hiver (kW _{GTH} /h)	Hiver (kW _{GTH} /h)
2018	105.1	-99.6	31.4	-29.8
2019	426.8	-462.0	127.5	-138.0
2020	761.6	-837.5	227.5	-250.2
2021	1 185.9	-1 169.1	354.2	-349.2
2022	1 185.0	-1 168.6	353.9	-349.0



11.3. SYNTHESE TECHNICO-ECONOMIQUE ESTIMATIVE

Nota : Les coûts ci-dessous sont fournis à titre indicatif n'étant pas l'objet de la mission du BRGM

Comparatif des 3 scénarios (avec climatisation réduite) et de la solution classique :

	Scénario 1	Scénario 2	Scénario 3	Classique
Bilan thermique	MWh/an	MWh/an	MWh/an	MWh/an
Chauffage + ECS *				
Livré (énergie utile)	1 844	1 844	1 844	1 844
Puisé dans le stockage	1 280	536	1 185	
Gaz consommé				1 970
Climatisation				
Livré (énergie utile)	1 217	1 217	1 217	1 217
Injecté dans le stockage	1 244		1 172	
Rejets aérothermiques		3 652		1 700
Solaire thermique				
Capté (7200 m ² de panneaux)		4 527		
Direct chauffage + ECS		1 308		
Direct climatisation		2 435		
Stocké		784		
Gestion du stockage				
Bilan / Pertes thermiques	≈ 0	238	≈ 0	
Total thermique non renouvelable				1 970

Bilan électrique	MWh/an	MWh/an	MWh/an	MWh/an
Saison hivernale	270	33	377	
Saison estivale	340	122	241	485
Gestion du stockage	100	53	95	
Dépense électrique totale	710	208	713	485

Investissements spécifiques	k€ HT	k€ HT	k€ HT	k€ HT
Equipement du Puits Y	1 500	1 500		
Champ de sondes			1 150	
Champs solaires		1 800		
Machineries à sorption		770		
Machineries pompe à chaleur	500		500	300
Réseau primaire (< 1000 m)	300	300	300	500
Chaufferie gaz centralisée				200
Sous-stations spécifiques				200
Total	2 300	4 370	1 950	1 200
Ingénierie (7%)	161	306	137	84

11.3.1. Comparatif des 3 scénarios et d'un appoint centralisé pour la climatisation

L'appoint ci-dessous est supposé être appliqué exclusivement pour la climatisation. Il repose sur la technique de la climatisation solaire à sorption qui a été appliquée pour le scénario 2.

	Scénario 1	Scénario 2	Scénario 3	Appoint
Bilan thermique	MWh/an	MWh/an	MWh/an	MWh/an
Chauffage + ECS *				
Livré (énergie utile)	1 844	1 844	1 844	
Puisé dans le stockage	1 280	536	1 185	
Climatisation				
Livré (énergie utile)	1 217	1 217	1 217	540
Injecté dans le stockage	1 244		1 172	
Rejets aérothermiques		3 652		1 620
Solaire thermique				
Capté (7200 m ² + 1720 m ² de panneaux)		4 527		2 700
Direct chauffage + ECS		1 308		
Direct climatisation		2 435		1 080
Stocké		784		
Gestion du stockage				
Bilan / Pertes thermiques	≈ 0	238	≈ 0	

Bilan électrique	MWh/an	MWh/an	MWh/an	MWh/an
Saison hivernale	270	33	377	
Saison estivale	340	122	241	54
Gestion du stockage	100	53	95	
Dépense électrique totale	710	208	713	54

Investissements spécifiques	k€ HT	k€ HT	k€ HT	k€ HT
Equipement du Puits Y	1 500	1 500		
Champ de sondes			1 150	
Champs solaires		1 800		430
Machineries à sorption		770		340
Machineries pompe à chaleur	500		500	
Réseau primaire (< 1000 m)	300	300	300	
Chaufferie gaz centralisée				
Sous-stations spécifiques				
Total	2 300	4 370	1 950	770
Ingénierie (7%)	161	306	137	54

12. Conclusions

A l'échelon de la préfaisabilité, la présente étude examine les solutions techniques qui seraient applicables pour exploiter un ancien puits de mine, le Puits Y, à des fins de confort thermique pour les locaux de la ZA Morandat qu'il est programmé d'aménager à Gardanne. Une surface de planchers de 65 500 m² est prise en considération comportant 8 000 m² de locaux rénovés ou à rénover, essentiellement dédié à des activités tertiaires et économiques. Les aménagements sont prévus en trois tranches livrées entre 2018 et 2021.

La présente étude de préfaisabilité technique s'applique en priorité à l'exploitation du Puits Y dont il s'avère que la particularité est de constituer un réservoir d'eau souterrain de l'ordre de 60 000 m³ et dont la température naturelle se situe encore actuellement à moins de 30 °C. Le Puits Y est, en effet, un puits aveugle car son cuvelage est étanche et les recettes sont localisées exclusivement en fond de puits dans une zone profonde de l'ancienne mine sans écoulement connu. Le Puits Y est ennoyé sur environ 800 m de haut et le niveau de l'eau est localisé à approximativement 300 m sous la surface du sol.

A la question de l'aménageur de savoir s'il paraît techniquement possible d'exploiter le Puits Y dans un système énergétique, la réponse de la présente étude est donc positive mais sous réserves. En effet, du fait des contraintes imposées i) par le niveau de l'eau dans le Puits Y, à environ -300 m sous la surface, et ii) par la capacité thermique limitée du Puits Y, l'équipement du Puits Y et son mode d'exploitation doivent être adaptés. Cela paraît techniquement envisageable, bien que pouvant nécessiter des développements spécifiques.

Dans le contexte de la ZA Morandat, l'emploi du Puits Y ne paraît pouvoir s'envisager que comme composant d'un système exploitant un réseau d'énergie. Le Puits Y jouerait alors exclusivement le rôle d'un réservoir de stockage d'énergie thermique. En cela, l'exploitation du Puits Y ne peut aucunement être assimilée à une exploitation géothermique conventionnelle.

Une première phase de simulation sommaire, envisageant des pompes à chaleur réparties le long d'un réseau d'énergie en boucle tempérée pour le chauffage comme pour la climatisation, a montré que la capacité de stockage thermique matérialisée par le Puits Y correspond approximativement aux besoins en chaleur durant la saison hivernale, cela en prenant comme hypothèse un ΔT de 15 °C entre la température basse dans le Puits Y en fin de saison hivernale et la température haute dans le Puits Y en fin de saison estivale.

Il a également été montré que cette exploitation du Puits Y pour fournir la chaleur hivernale n'est envisageable qu'à la condition d'être en mesure de réinjecter une quantité équivalente de chaleur en période estivale, ladite chaleur estivale provenant alors des rejets des climatisations.

Or, les estimations des demandes en climatisation issues des travaux du bureau d'étude BG conduiraient à une réinjection de chaleur supérieure aux puisages de chaleur. Par voie de conséquence, la présente étude recommande un réexamen de l'équilibre entre besoins en rafraîchissement et besoins de chaleur afin de maintenir la température du Puits Y sous une valeur de l'ordre de 30 °C à 35 °C en fin de saison estivale. En cas contraire, le système comprenant le Puits ne pourrait s'appliquer à l'ensemble de la ZA Morandat.

La présente étude de préfaisabilité technique a aussi examiné un mode alternatif de fonctionnement du Puits Y à relativement haute température (de l'ordre de 50 °C), une solution géothermique de repli sur champ de sondes géothermiques et, plus succinctement, les différentes possibilités techniques permettant d'accroître la capacité thermique du Puits Y.

Le Comité de Pilotage du 12 janvier 2016 a demandé à ce que soient approfondis trois scénarios en seconde phase, à savoir deux scénarios d'exploitation du Puits Y et un troisième avec une solution géothermique connue afin d'établir une référence technico-économique.

- **Scénario 1-** Le premier scénario considère le Puits Y comme un réservoir d'énergie thermique dont le niveau de la température est maintenu suffisamment bas pour pouvoir être utilisé pour le chauffage, pour l'ECS et pour la climatisation ; ces trois usages recourant à des pompes à chaleur à compression mécanique pour adapter le niveau de la température. La distribution de l'énergie thermique se fait via un réseau en boucle tempérée, typiquement à moins de 30 °C. Pour être pérenne, ce système impose que les quantités d'énergie puisées dans le Puits Y pour le chauffage et pour l'ECS (eau chaude sanitaire) soit légèrement plus importantes que les rejets thermiques des climatisations qui y sont réinjectés. Dans ce contexte, la température dans le Puits Y tend à rester relativement homogène du fait des phénomènes de convection naturelle entretenus par une température des roches profondes supérieure à celle de l'eau dans le Puits Y.
- **Scénario 2-** Le second scénario considère le Puits Y comme un réservoir d'énergie thermique dont le niveau de la température est maintenu à relativement haute température (typiquement entre 40 °C et 50 °C) autorisant le chauffage par usage direct de la chaleur et, comme souhaité par le Comité de Pilotage, pouvant contribuer au fonctionnement de climatisations à sorption. Ce scénario implique l'accès à des ressources thermiques renouvelables ou fatales en remplacement de l'énergie mécanique ou électrique des pompes à chaleur à compresseur des scénarios 1 et 3 ; le Puits Y servant alors de réservoir de stockage. L'analyse a été conduite sur la base d'une énergie thermique fournie par des panneaux solaires plans. Dans ce contexte, une stratification de la température peut être constatée sur la hauteur du Puits Y avec une plus haute température en partie supérieure.
- **Scénario 3-** Le troisième scénario recourt à la technique du champ de sondes géothermiques (BTES – Borehole Thermal Energy Storage) qui est exploité de manière comparable au scénario 1, c'est-à-dire avec une distribution via un réseau en boucle tempérée et à des pompes à chaleur à compression mécanique. Toutefois, la température de fonctionnement est inférieure d'une dizaine de degrés.

Pour le **scénario 1**, en référence à des réseaux d'énergie thermique récemment mis en service, il a été considéré qu'un réseau de chauffage en boucle tempérée pouvait être raccordé au Puits Y et que, dans ce cas, une température de retour de l'ordre de 13°C était réaliste. Dans ce cas, un ΔT de l'ordre de 15 °C pourrait être représentatif ; ce qui correspond à une capacité thermique du stockage de l'ordre de 1,3 GWh si l'on tient compte du volume d'eau dans le Puits Y et du volume des roches thermiquement impactées au voisinage immédiat du cuvelage. L'étude a montré que si une telle énergie (1,3 GWh) est puisée en saison hivernale, alors elle doit être compensée par l'injection d'une énergie thermique du même ordre en saison estivale, au risque de constater une dérive thermique progressive de la température du puits conduisant à une dégradation de la performance énergétique, c'est-à-dire de la facture en énergie électrique nécessaire au fonctionnement des machineries thermodynamiques raccordées au réseau en boucle tempérée.

Or, l'étude a montré que la demande thermique de la ZA Morandat, pourrait être fortement déséquilibrée du fait de la forte demande en rafraîchissement des locaux et que, sans adaptation de la performance énergétique des locaux raccordés, un fort risque de déséquilibre thermique dans le sens d'un réchauffement rapide du Puits Y serait constaté.

Au moins pour le **scénario 1**, la présente étude recommande donc au maître d'ouvrage d'envisager un abaissement des besoins en climatisation raccordés au Puits Y afin d'assurer l'équilibrage des puisages de chaleur en saison hivernale et des réinjections de chaleur en période estivale. Puisque, dans le **scénario 1**, la distribution s'opère en boucle tempérée et suppose que des machineries thermodynamiques de type thermofrigopompes réparties au

niveau de chaque sous-station optimisent localement la gestion des énergies thermique, par exemple en produisant l'ECS avec les excédents de la climatisation, les deux principales options à disposition du maître d'ouvrage pour limiter les impacts pénalisants d'une trop forte demande en climatisation sont :

- 3) Moins climatiser tout ou partie des locaux
- 4) Doter le réseau d'un appoint en climatisation aérothermique et/ou solaire

Pour le **scénario 2**, en raison de l'ensoleillement et de la possible disponibilité de ressources thermiques fatales, l'étude a considéré l'hypothèse de porter le réservoir de stockage constitué par le Puits Y à un niveau de température de 50 °C mais pouvant théoriquement atteindre 70°C, voire 80°C, s'il est démontré que le cuvelage peut supporter durablement un tel niveau de la température. Dans le **scénario 2**, le chauffage et l'ECS sont assurés sans recourir à des pompes à chaleur. Par contre, pour assurer le rafraîchissement des locaux, l'étude a considéré l'implantation de groupes à sorption (adsorption ou absorption) et des dispositifs aérothermiques pour évacuer la chaleur résiduelle. Les machineries à sorption ont des rendements énergétiques faibles mais économiquement attractifs lorsque les ressources thermiques sont abondantes et à coûts résultants faibles.

L'étude, a supposé que la chaleur fournie aux dispositifs à sorption était une combinaison de la chaleur déstockée issue du Puits Y et de la chaleur solaire ou fatale en usage direct. Les simulations sommaires au pas de temps mensuel ont alors montré que le stockage n'était pratiquement sollicité que pour le mode chauffage et très peu pour le rafraîchissement. La surface de panneaux solaires qui serait nécessaire sur le secteur de de Gardanne a été évaluée à environ 7 200 m², cela toujours dans l'hypothèse d'une performance accrue des locaux en matière de rafraîchissement.

Pour le **scénario 3**, l'étude a considéré l'hypothèse d'une solution de repli en champ de sondes géothermiques qui serait appliquée à tout ou partie de la ZA Morandat, la distribution d'énergie thermique restant similaire à celle du scénario 1. En cela, le but a été de constituer une référence de comparaison technico-économique, tant pour l'investissement que pour le fonctionnement. Cette référence a complété le référentiel usuel considérant le gaz pour le chauffage et les groupes froids aérothermiques conventionnels pour la climatisation.

Pour établir une comparaison technico-économique objective des trois scénarios, bien que cela n'ait pas été prévu dans le programme prévisionnel, l'étude a complété les résultats en matière de bilan énergétique par i) une estimation des investissements spécifiques, ii) une estimation de ce que pourrait représenter l'appoint nécessaire en matière de climatisation et iii) une estimation sommaire basée sur le référentiel usuel ci-dessus.

Il ressort de ce comparatif qu'un système énergétique recourant au Puits Y, en tant que stockage thermique périodique, est techniquement envisageable mais serait économiquement pénalisé par le niveau de l'eau à 300 m sous la surface du sol et par la température de l'eau qui n'est pas immédiatement propice aux usages de rafraîchissement qui sont très significatifs dans le programme d'aménagement envisagé.

Néanmoins, sous réserve de confirmation par une étude en coût global, ces éléments budgétaires ne paraissent pas rédhibitoires. Par contre, si une énergie fatale disponible en permanence et en abondance venait à être accessible au niveau de la ZA Morandat, l'intérêt énergétique du Puits Y pourrait alors être remis en question.

Annexe 1

Vues du secteur d'aménagement de la ZA Morandat

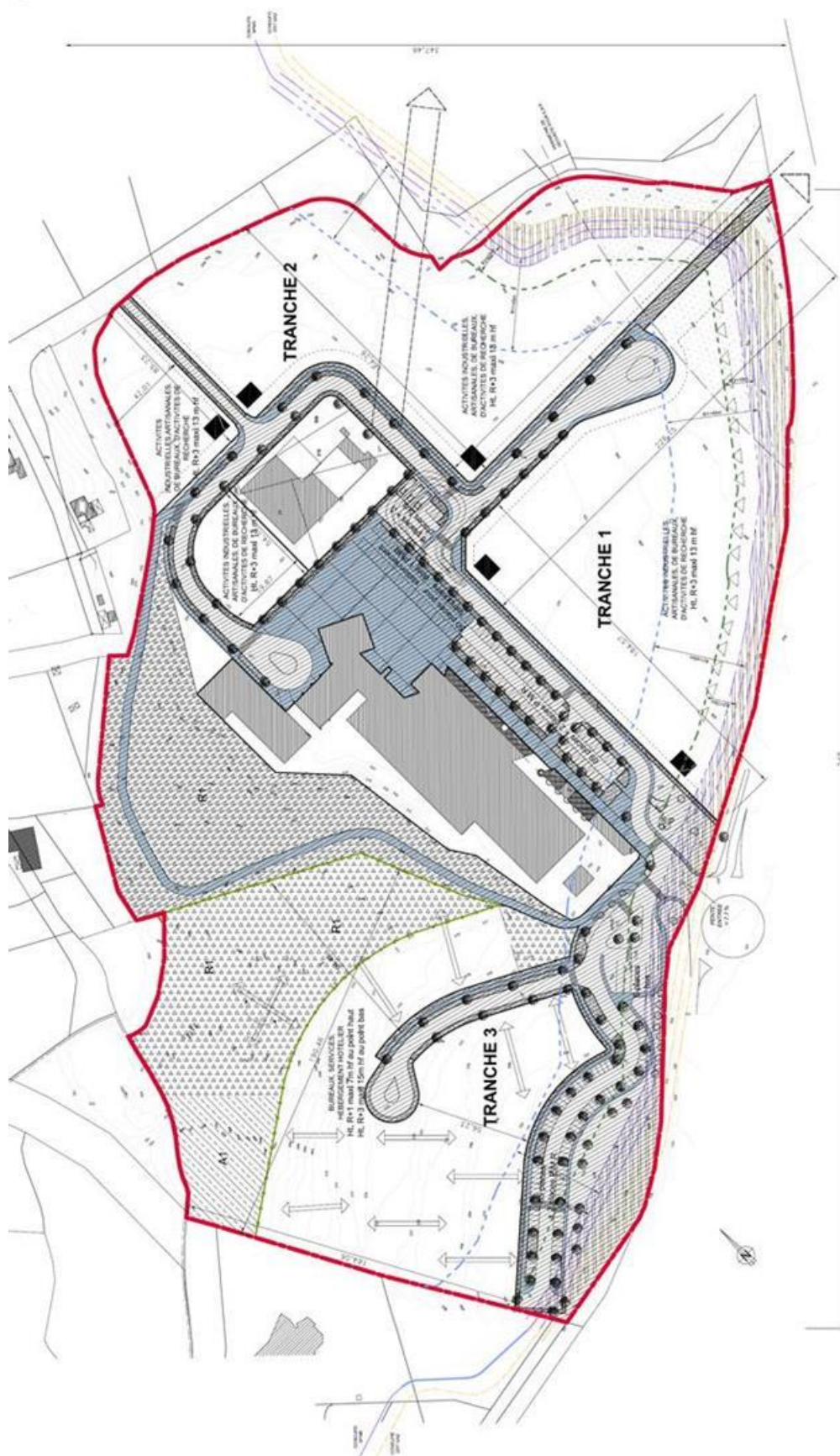


Figure 98 : Localisation des tranches prévisionnelles d'aménagement



Figure 99 : Topographie de la ZA Morandat et possibles constructions

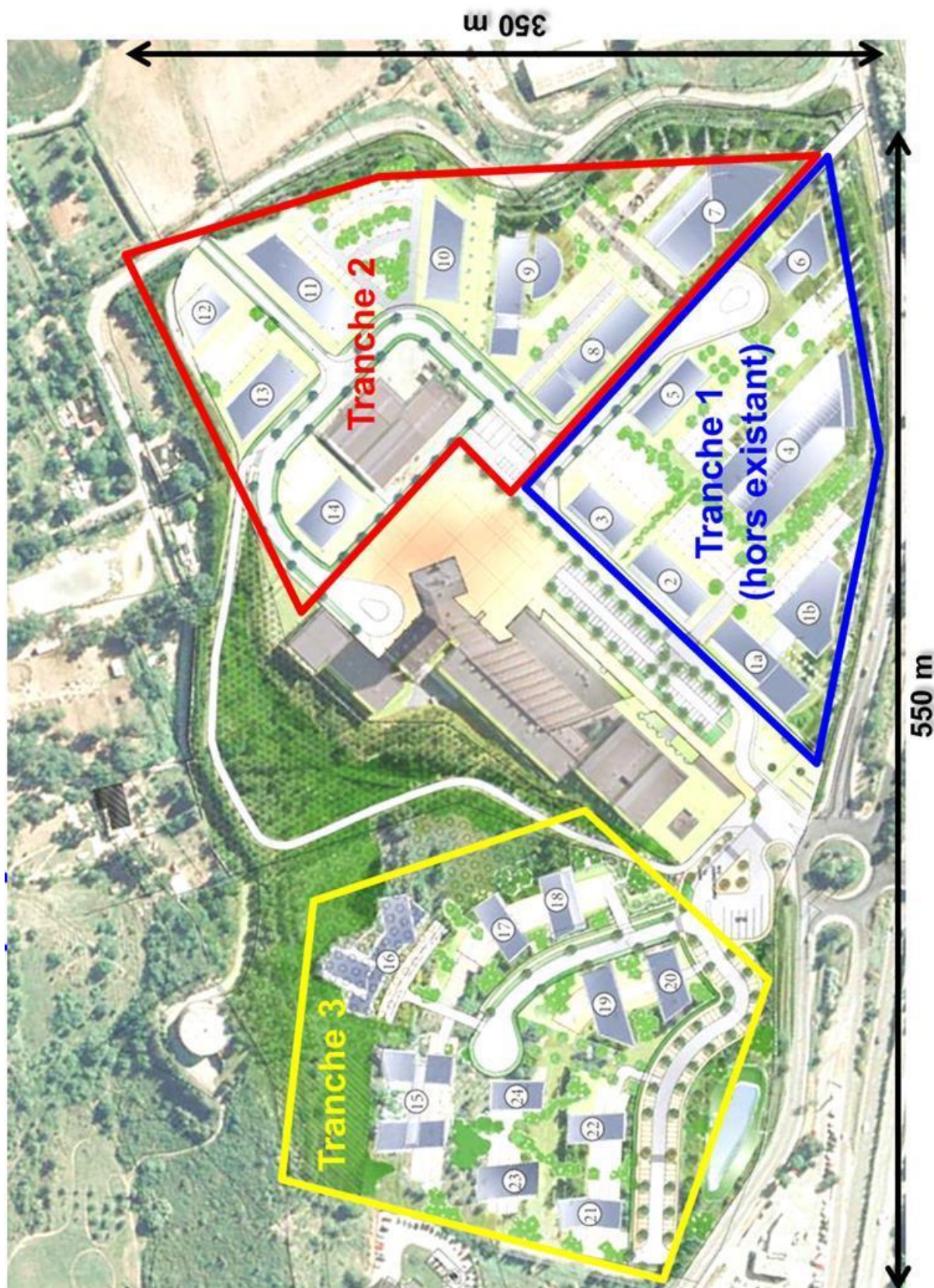


Figure 100 : Délimitation des tranches d'aménagement et des possibles constructions

Annexe 2

Eléments de contexte liés à l'ancienne mine



Figure 101 : Localisations géographiques des Puits de mine (source BRGM/DPSM)

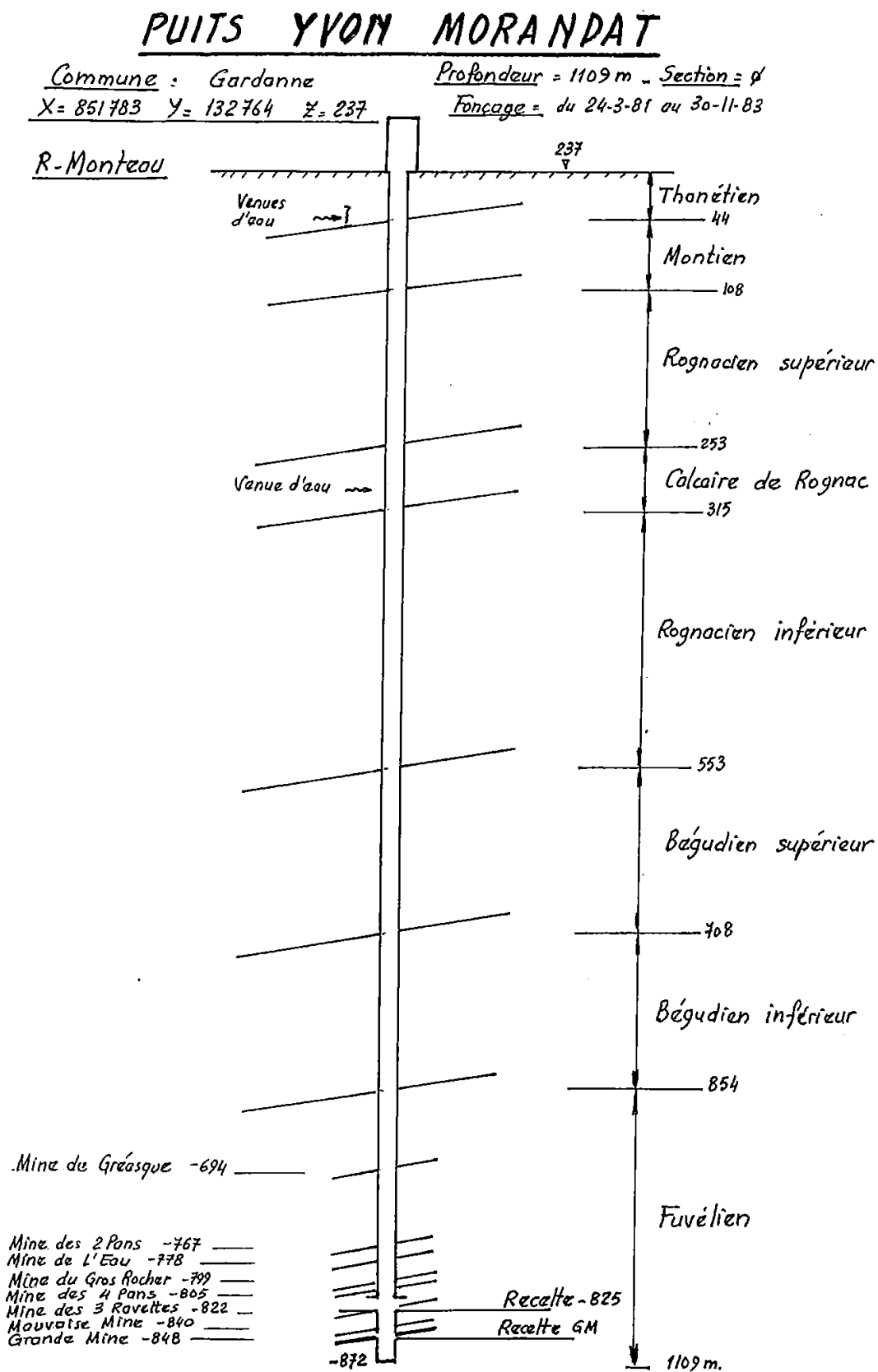


Figure 102 : Positionnement des recettes dans le Puits Y (source BRGM/DPSM)

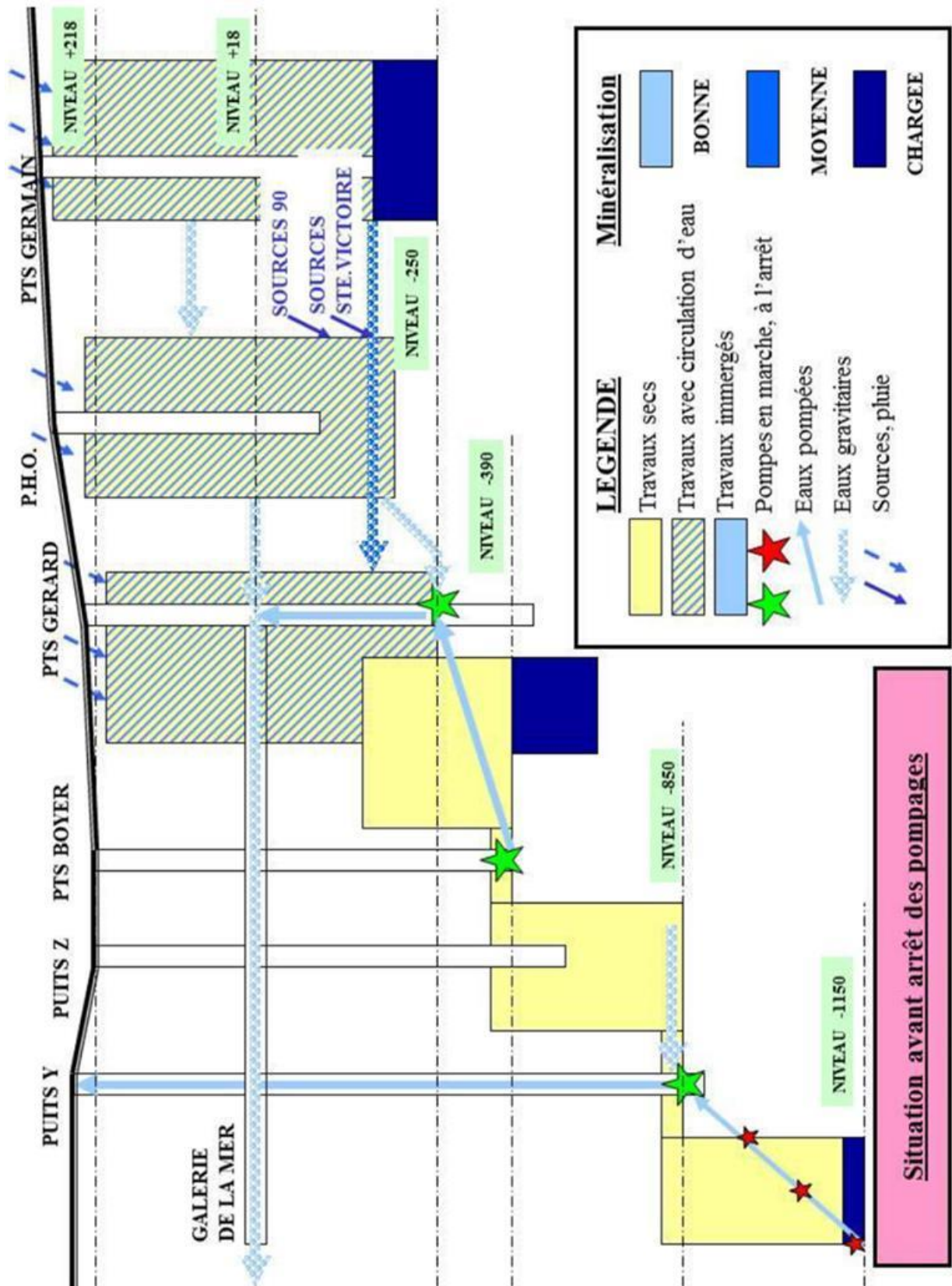


Figure 103 : Schéma du fonctionnement hydrologique de la mine pendant l'exploitation (source BRGM/DPSM)

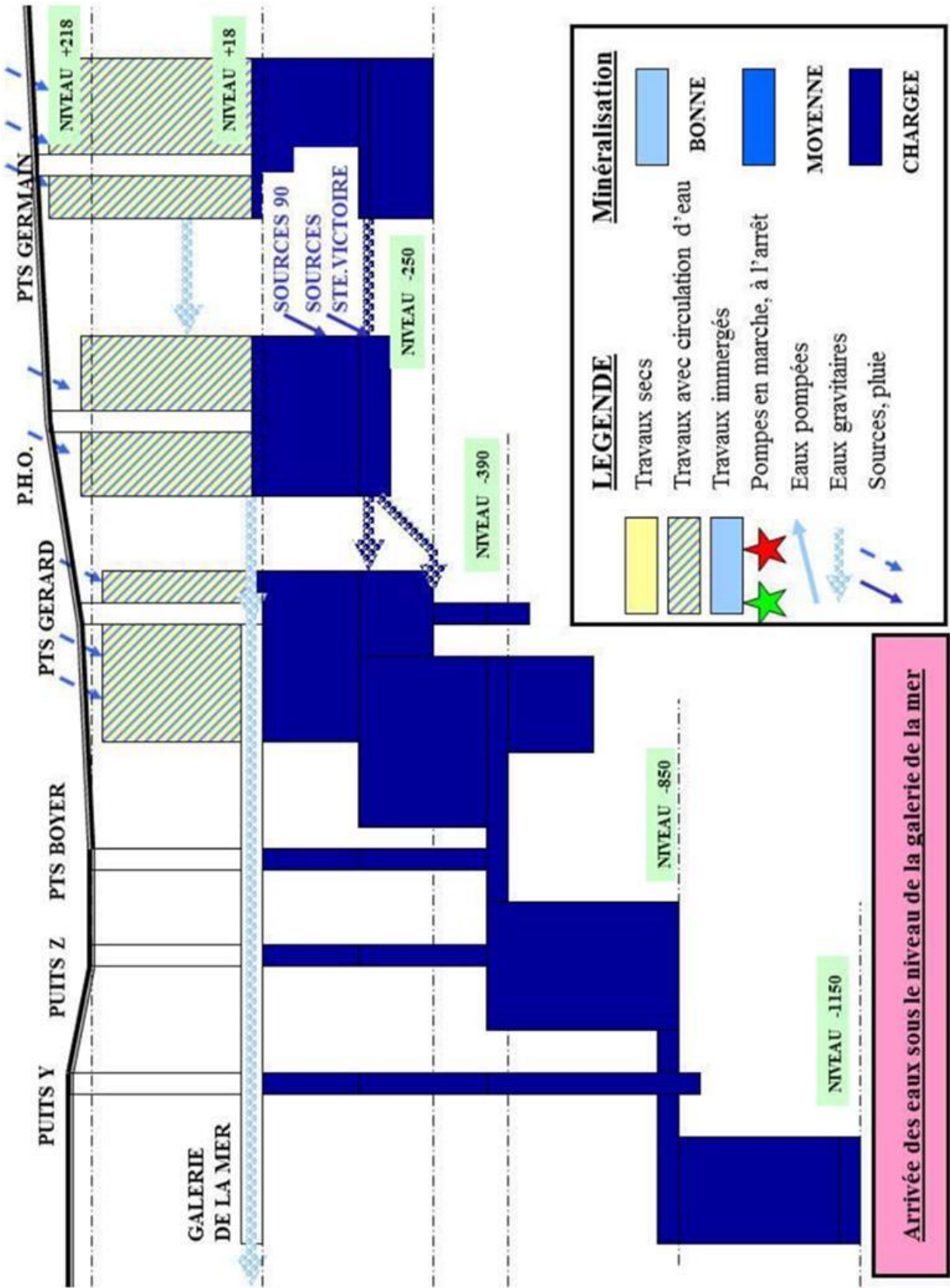


Figure 104 : Schéma du fonctionnement hydrologique de la mine post-exploitation (source BRGM/DPSM)

Annexe 3

Fiche Secteur Clé N°3 : ZAC Morandat (source : bureau d'étude BG, mars 2014)

Fiche Secteur Clé n°3

Concept de boucle d'eau tempérée pour la future ZA du Puits Morandat

Contexte



- Création d'une zone d'activité économique : ZA du Puits Morandat (horizon 2020 - 2025)
- Zone comprenant des bureaux (48 000 m² au total avec 40 000 m² de bâtiments neufs)
- Zone située autour de l'ancien puits de la mine
- Potentiel projet d'écoquartier au niveau de la nouvelle zone de développement urbain situé au nord est de la ZA



Concept énergétique retenu

Le concept énergétique proposé au niveau du Puits Morandat consiste à :

- Valoriser les eaux d'ennoyage de la mine pour alimenter en énergie la future ZA

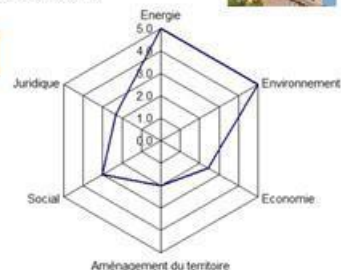


Diagramme radar - résultat analyse multicritères

(cf. rapport phase 2 de l'étude)

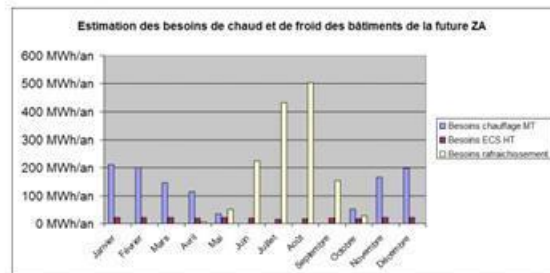
Objectifs

- => Réduire les consommations d'énergie finale et primaire,
- => Améliorer la qualité de l'air et réduire les émissions de polluants en centralisant la production d'énergie,
- => Valoriser les rejets thermiques et ressources renouvelables à proximité et proposer une énergie à coût maîtrisé aux utilisateurs.

Description

Une évaluation préliminaire des besoins énergétiques de la ZA a été réalisée en utilisant les ratios énergétiques de la RT 2012 et en considérant que les bâtiments existants étaient rénovés.

	Bâtiments existants rénovés	Nouveaux bâtiments
Besoins de chauffage	40 kWh/m ²	20 kWh/m ²
Besoins d'ECS	5 kWh/m ²	
Besoins de rafraîchissement	50 kWh/m ²	25 kWh/m ²



La valorisation de ressources renouvelables

Du fait de la localisation de la ZA au niveau du Puits Morandat, nous proposons de valoriser les eaux d'ennoyages de la mine pour maintenir la boucle à une certaine température. D'après les premières analyses du BRGM, ces eaux d'ennoyage sont à environ 25°C. Ce niveau de température est adéquat pour une boucle tempérée car il est peu éloigné des niveaux de température des besoins des bâtiments ($\Delta \pm 10^\circ \text{C}$). Ce delta de température pourra facilement être corrigé avec l'utilisation d'une pompe à chaleur réversible. De plus, l'utilisation d'une même ressource pour le chaud et le froid va permettre indirectement de stocker les calories excédentaires de la période estivale pour les utiliser pour le chauffage lors de la période hivernale.

Une étude est actuellement en cours de réalisation par le BRGM, concernant la possibilité de valoriser énergétiquement les eaux d'ennoyage de la mine et de réaliser un stockage saisonnier. Les résultats de cette étude permettront de valider ce concept énergétique et de préciser son fonctionnement. En cas de résultats négatifs, le concept énergétique pourra être adapté à la valorisation du sous-sol via un champ de sondes géothermiques verticales (sous réserves de forages tests) au lieu des eaux d'ennoyage de la mines.

Les toitures des bâtiments pourront être valorisées pour la mise en œuvre de capteurs solaires thermiques afin de couvrir les besoins d'ECS et/ou de panneaux solaires photovoltaïques afin de compenser les consommations électriques liées aux pompes de circulation du concept et à l'utilisation de pompes à chaleur.

Le concept de boucle tempérée (à partir du captage des eaux d'ennoyage)

L'utilisation d'une boucle tempérée permet de pouvoir subvenir aux besoins de chaud et de froid via un seul réseau aller-retour (2 tubes). Une pompe à chaleur réversible pourra être mise en œuvre au niveau des sous-stations afin de relever la température pour le chauffage basse température et pour l'ECS (PAC haute température particulière) et d'abaisser la température pour le rafraîchissement.

Notons qu'une seconde option pourrait aussi être envisagée sur le secteur de la ZA du Puits Morandat : utiliser deux réseaux (4 tubes) d'alimentation énergétique distincts pour le chaud (eau chaude 40-50°C) et le froid (eau glacée : 6-12°C) afin de distribuer l'énergie produite au niveau d'une centrale de production équipée d'une thermofrigopompe qui valoriserait les eaux d'ennoyage de la mine pour produire du chaud et du froid. L'inconvénient de cette option est qu'elle nécessite l'implantation de deux réseaux de distribution distincts. De plus les pertes thermiques sont plus importantes.

Option

Le réseau mis en place pourra aussi alimenter l'écoquartier situé au nord de la ZA et les serres (maraîchères et horticoles) à proximité.

Planning de mise en œuvre

Priorité	Actions	Temps estimé	Qui ?
1	Définir le type d'entreprises qui vont s'installer dans la ZA (typologie des besoins ? Besoins énergétiques spécifiques ? Process industriel ?)	-	SEMAG, la Ville de Gardanne
2	Etude de faisabilité technico-économique à propos de la valorisation des eaux d'ennoyage de la mine pour alimenter une nouvelle zone de développement urbain : - Estimation des besoins énergétiques des bâtiments de la nouvelle zone de développement urbain (quantification, performance énergétique visée, niveau de température des besoins, système de distribution,...). - Approche technico-économique et analyse des potentiels de valorisation d'énergies renouvelables ou de eaux d'ennoyage de la mine pour la production d'énergie pour la zone (étude de compétitivité de valorisation des eaux d'ennoyage vis-à-vis des autres énergies renouvelables). - Elaboration d'un concept énergétique global et provisoire prenant en compte la planification de développement de la zone, - Définition des mesures conservatoires à considérer pendant la construction de la ZA afin d'anticiper la mise en œuvre du concept énergétique provisoire et global (ex: conduite de réseau, champ de sondes, ...) - Concertation avec les acteurs tels que la Ville de Gardanne et la SEMAG, - Portage technique : étude de moyens à mettre en œuvre pour la gestion et l'exploitation du concept énergétique.	8 mois	Bureau d'études, Ville de Gardanne, SEMAG
3	Etude de faisabilité juridique et financière à propos de la valorisation des eaux d'ennoyage de la mine pour alimenter une nouvelle zone de développement urbain : - Approche financière complète en prenant en compte de l'aspect planification dans le temps. - Etude des variantes de portage juridique.	4 mois	Bureau de conseil financier, Cabinet juridique, Ville de Gardanne, SEMAG
4	Prise de décision concernant le lancement du projet	-	SEMAG, la Ville de Gardanne

Approche économique et financière (fourchettes budgets approximatifs)

- Coût d'une étude de faisabilité technico-économique pour la valorisation des eaux d'ennoyage de la mine pour alimenter une nouvelle zone de développement urbain : 20 000 à 30 000 €
- Coût d'une étude de faisabilité juridique et financière pour la valorisation des eaux d'ennoyage de la mine pour alimenter une nouvelle zone de développement urbain : 10 000 à 20 000 €
- Informations concernant la mise en œuvre d'un projet de réseau de chaleur avec valorisation des eaux d'ennoyage de la mine :
 - Aides mobilisables : Fonds Chaleur Renouvelable PACA (ADEME et MEDDE) - aides maximum 2013 : 60% de l'investissement selon les critères de plafond assiette (aide limitée à une valeur en €/ mètre linéaire de réseau)
 - Dans le cas d'un réseau de chaleur alimenté à plus de 50% par des énergies renouvelables, la TVA applicable au prix de vente du kWh est de 5.5%
 - Taxe de prélèvement d'eaux sous-terraines (taux applicable en 2017, réf L213.19§2) : 1.00 €/k.m3

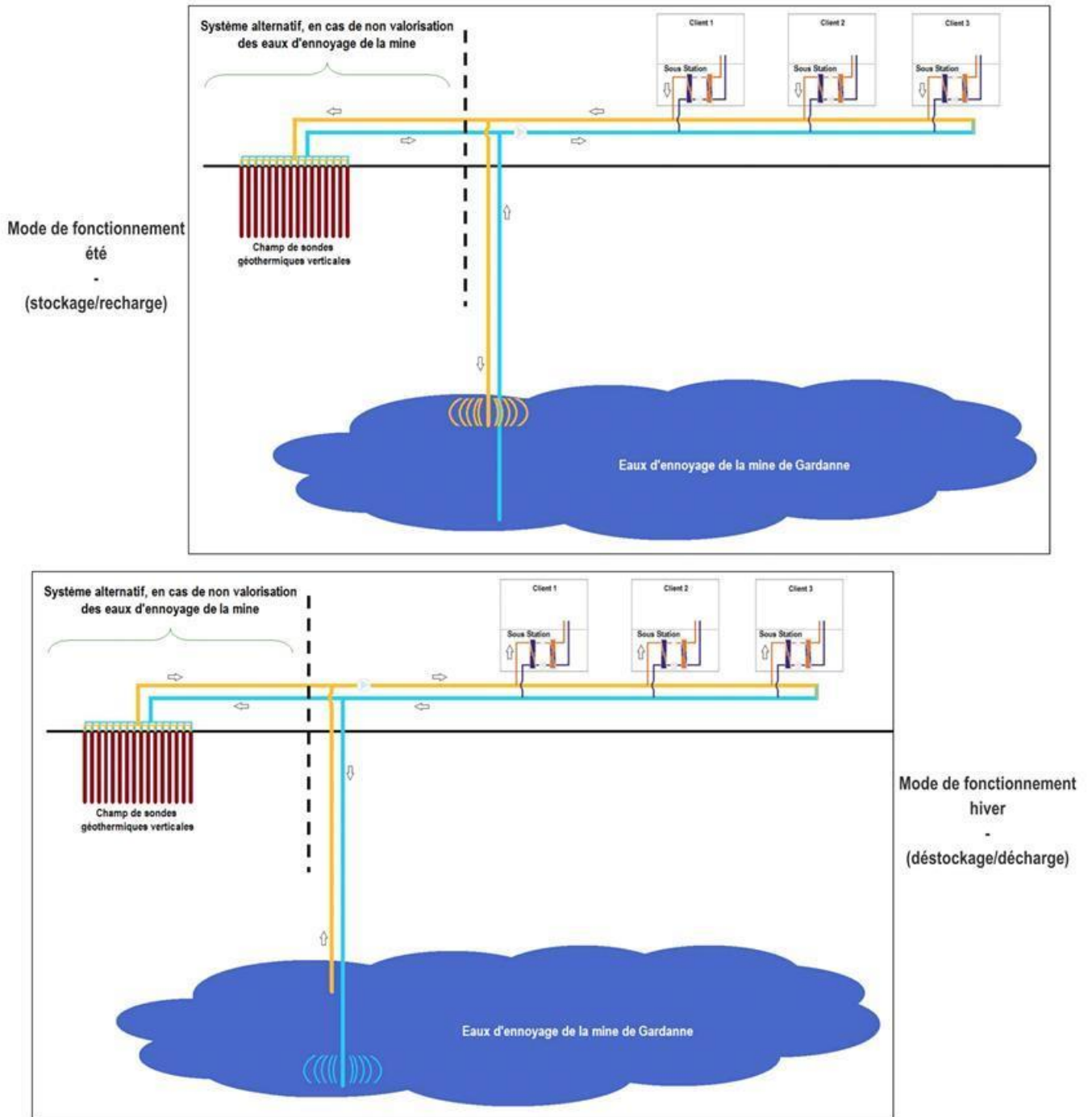
Portage du projet

Plusieurs pistes de portage sont évoquées dans le cadre de la valorisation des eaux d'ennoyage de la mine pour alimenter une nouvelle zone de développement urbain :

- Gestion partielle par un exploitant (ou la SEMAG) qui pompe l'eau souterraine et exploite le réseau tempérée, puis qui vend les m3 selon les besoins des bâtiments. Les bâtiments gèrent ensuite eux-mêmes la production d'énergie au niveau des sous-stations (alimentation des échangeurs des sous-stations des bâtiments).
- Gestion globale par un exploitant (ou la SEMAG) qui pompe l'eau sous terrain, exploite le réseau tempérée et gère la production d'énergie au niveau des différentes sous-stations, puis qui vend des kWh de chaud ou de froid aux bâtiments selon leurs besoins (distribution dans les bâtiments).

Le montage juridique devra être choisi par le Maître d'Ouvrage en fonction des résultats de l'étude de faisabilité juridique et financière (DSP, Régie, Concession, PPP,...)

Illustration du concept énergétique



Annexe 4

Compléments pour esquisser une fiche selon le formalisme des aides de l'ADEME

COMPARATIF DES TROIS SCENARIOS SELON FORMALISME ADEME

Note introductive

Cette annexe est construite en s'inspirant du formalisme de l'ADEME des éditions 2016 des mécanismes "fonds chaleur renouvelable" et "NTE – Nouvelles Technologies Emergentes". Ces deux appels à projets s'appliquent à la géothermie et apparentés, aux réseaux de chaleur, au solaire thermique et aux énergies fatales.

- Les scénarios 1 et 3 relèvent des fiches Géothermie et Réseaux de chaleur
- Le scénario 2 relève des fiches Géothermie, Réseaux de chaleur Solaire thermique et/ou Valorisation d'énergie fatale

On notera que, dans les deux appels à projets de l'ADEME, les fiches relatives au solaire thermique semblent n'envisager que la production d'eau chaude sanitaire. Concernant la valorisation de la chaleur fatale, elle paraît essentiellement perçue au travers d'une revente à un réseau de chaleur.

Les trois scénarios développés pour la ZA Morandat prennent en compte les trois usages thermiques : Chauffage, ECS et Climatisation / Rafraîchissement.

Les trois scénarios développés pour la ZA Morandat ajoutent une dimension "stockage inter-saisonnier" que l'on pourra considérer comme étant indirectement prise en considération par la fiche Géothermie. Cette fiche prend également indirectement en considération le Puits Y (scénarios 1 et 2) via l'ouverture explicite à la valorisation des eaux de mines même si le Puits Y est un puits aveugle et donc, à ce titre, plus à considérer comme étant un réservoir de stockage qu'une ressource valorisable.

Les tableaux qui suivent sont donc inspirés des deux fiches d'instruction "Géothermie" pour les appels à projet 2016 : "Fonds Chaleur Renouvelable" et "NTE".

Pour être complet, il faut également noter que les IA (investissements d'avenir) portés par l'ADEME comprennent un AAP ENR ouvert le 3 décembre 2015 et se clôturant en trois vagues le 27 février 2017. Cet AAP est nécessairement coordonné par une entreprise et peut attribuer des avances remboursables et des subventions.

1) Cadre de l'opération

a) Géothermie intermédiaire :

Présentation des caractéristiques générales du projet :

- Besoins thermiques utiles communs aux trois scénarios
- Caractéristiques des installations de surface pour les trois scénarios
 - Production
 - Distribution
- Caractéristiques des installations de captage de l'énergie géothermique pour les trois scénarios
 - *Scénarios 1 et 2 : Installation avec ouvrage profond dans un ancien puits de mine*
 - *Scénario 3 : Installations avec champ de sondes*
- Définition des caractéristiques de la solution géothermique / solution de référence
- Description de la solution de référence
 - Comparatif énergétique

2) Besoins thermiques utiles communs aux trois scénarios

2.1. Besoins énergétiques considérés

Besoins de chauffage, d'eau chaude sanitaire et de froid associés.

Surfaces SHON (m²)	Tranche 1 année 1	Tranche 2 année 2	Tranche 3 année 3	Totaux après année 3
Tertiaire rénové	1 060	0	0	1 060
Entreposage rénové	640	0	0	640
Centre-Multi-Culturel	0	0	4 440	4 440
Hôtellerie	0	0	3 500	3 500
Tertiaire neuf peu climatisé	6 702	6 954	3 375	17 031
Tertiaire neuf climatisé	13 404	13 908	9 669	36 981
Hôtel d'entreprises	1 800	0	0	1 800
Totaux	23 606	20 862	20 984	65 452

Besoins énergétiques en énergie utile	Chauffage (kWh/m².an)	ECS (kWh/m².an)	Froid (kWh/m².an)
Tertiaire rénové	40	5	50
Entreposage rénové	40	0	0
Centre-Multi-Culturel	40	5	5
Hôtellerie	20	20	25
Tertiaire neuf peu climatisé	20	5	5
Tertiaire neuf climatisé	20	5	25
Hôtel d'entreprises	40	5	25

Besoins énergétiques en énergie utile	Chauffage (MWh/an)	ECS (MWh/an)	Froid (MWh/an)
Tertiaire rénové	42	5	53
Entreposage rénové	26	0	0
Centre-Multi-Culturel	178	22	22
Hôtellerie	70	70	88
Tertiaire neuf peu climatisé	341	85	85
Tertiaire neuf climatisé	740	185	925
Hôtel d'entreprises	72	9	45
Totaux	1 468	377	1 217

2.2. Caractéristiques des installations de surface pour les trois scénarios

2.2.1. Production

Présentation succincte des équipements justifiés par l'étude des besoins thermiques des bâtiments

Scénario 1 • Chauffage • ECS • Climatisation	PAC : Machineries de type Thermo-Frigo-Pompe		
	Puissance installée (kW)	COP ou EER*	Type de fluide frigorigène
Saison hivernale	Restitué : 610 kW Géothermique : 500 kW	COP > 5.6 EER > 4	Non spécifié
Saison estivale	Restitué : 466 kW Géothermique : 572 kW	COP > 8 EER > 2.8	Non spécifié
Géocooling	Impossible		

Scénario 2 • Chauffage • ECS • Climatisation	Chauffage = Usage direct du déstockage et/ou du solaire ECS = Solaire direct, éventuellement après préchauffage par déstockage Climatisation = Machineries à sorption sur solaire direct		
	Puissance installée (kW)	COP ou EER*	Type de fluide frigorigène
Saison hivernale	Puisage de chaleur Puissance : 303 kW Energie : 540 MWh/an	Chauffage : Usage direct ECS : Usage direct	Sans objet
Saison estivale	Injection de chaleur Puissance : 415 kW Energie : 784 MWh/an	ECS : Usage direct EER sorption : 0,5	Selon machinerie à sorption
Géocooling	Impossible		

Scénario 3 • Chauffage • ECS • Climatisation	PAC : Machineries de type Thermo-Frigo-Pompe		
	Puissance installée (kW)	COP ou EER*	Type de fluide frigorigène
Saison hivernale	Restitué : 600 kW Géothermique : 462 kW	COP > 4 EER > 5.5	Non spécifié
Saison estivale	Restitué : 460 kW Géothermique : 542 kW	COP > 5 EER > 4.5	Non spécifié
Géocooling	Possible mais non considéré à ce stade de l'étude		

* COP : Coefficient de Performance donné par le constructeur (rapport de puissances à un point de fonctionnement de la PAC - préciser les températures de fonctionnement associées)

** EER : Energy Efficiency Ratio (Coefficient d'Efficacité Energétique) ou COP en mode froid

*** Froid : En cas de Géocooling, l'indiquer clairement

2.2.2. Distribution

Emetteurs de chaleur : description des émetteurs de chaleur/froid avec le régime de température associé

- Scénario 1, Scénario 2 et Scénario 3
 - Chauffage : planchers chauffants, émetteurs basse température ou ventilo-convecteurs
 - ECS : non spécifiés
 - Climatisation : plancher et/ou plafond rafraichissantes, ventilo-convecteurs

Réseau de chaleur (si nécessaire) : description (préciser longueur en m, nombre de sous-stations)

- **Scénario 1 et Scénario 3**
 - Réseau de chaleur en boucle tempérée
 - Au maximum 870 m de réseau primaire
 - Jusqu'à environ 25 sous-stations (une par groupe de bâtiments)
 - Machineries décentralisées au niveau des sous-stations
 - Pas d'appoint prévu en solution de base

- **Scénario 2**
 - Réseau de chaleur
 - Température maxi 70°C en mode stockage estival
 - Température départ réseau mini 40 °C en mode déstockage hivernal
 - Au maximum 870 m de réseau primaire
 - Jusqu'à environ 25 sous-stations (une par groupe de bâtiments)
 - Machineries décentralisées au niveau des sous-stations
 - Panneaux solaires en toiture (max 50 % de chaque toiture)
 - Chauffage par solaire direct et par déstockage en usage direct
 - ECS sur solaire direct en priorité, éventuellement avec préchauffage par le déstockage
 - Machinerie à sorption pour la climatisation
 - Pas d'appoint prévu en solution de base

2.3. Caractéristiques des installations de captage de l'énergie géothermique

2.3.1. Installation avec ouvrage profond dans un ancien puits de mine Scénarios 1 et 2

Ouvrages

Nombre de forage de production	1 en base 2 si option de sécurité retenue	
Nombre de forage de réinjection	1 en base 2 si option de sécurité retenue	
Profondeur (m)	Producteur 350 m (dont 300 m dans le vide) Injecteur : 1000 m à 1100 m	
Présence d'un échangeur primaire	☐ Oui	☒ Non
Distance entre forages (m)	Les deux ouvrages sont dans le même puits de mine de 10 m de diamètre	
Type de rejet en cas de non réinjection	Sans objet car le Puits Y est un puits de mine sans pratiquement de communication hydraulique avec le milieu encaissant	

Besoins en eau souterraine

Pour information car il n'y a pas à proprement parler de besoins en eau souterraine. En effet, c'est toujours la même eau contenue dans le Puits de mine qui est employée dans les Scénarios 1 et 2, pratiquement en circuit fermé.

Scénario 1 : Exploitation tempérée du Puits Y	Période hivernale	Période estivale
Débit maximum (m³/h)	62 m³/h	71 m³/h
Débit moyen (m³/h.an) correspondant à la durée de fonctionnement	47 m³/h	46 m³/h
Durée de fonctionnement annuelle (h/an)	Continu : Puisage hivernal et Injection estivale	
Ecart de température prélèvement/rejet (°C)	7°C (max 15 °C	7°C (max 15 °C

Scénario 2 : Exploitation à haute température du Puits Y	Période hivernale	Période estivale
Débit maximum (m³/h)	40 m³/h	50 m³/h
Débit moyen (m³/h.an) correspondant à la durée de fonctionnement	20 m³/h	29 m³/h
Durée de fonctionnement annuelle (h/an)	Continu : Puisage hivernal et Injection estivale	
Ecart de température prélèvement/rejet (°C)	7°C (max 15 °C	7°C (max 15 °C

2.3.2. Scénario 3 : Installations avec champ de sondes

Nombre de sondes (valeur minimale)	158
Profondeur (m)	100 m
Longueur totale (m) du captage	17 715 m
Type de sonde (simple U, double U, ...)	Double U ou Coaxial
Diamètre extérieur des tuyaux (mm)	Indifférent
Espacement moyen entre sondes (m)	4 m
Puissance d'extraction par m de sonde (W/m)	35 W/m
Surface au sol estimé	2 500 m ²
Volume de roche impacté	250 000 m ³
Capacité thermique saisonnière	1.2 GWh / saison
Durée de fonctionnement annuelle (h/an)	Continu : Puisage hivernal et Injection estivale

3) Définition des caractéristiques de la solution géothermique / solution de référence

Le scénario 1 représente une solution technologique sans équivalent dans le monde, du moins pour l'emploi d'un ancien puits de mine comme réservoir de stockage à température tempérée.

Le scénario 2 représente une solution technologique sans équivalent dans le monde, du moins pour l'emploi d'un ancien puits de mine comme réservoir de stockage à température intermédiaire. De plus, il ne semble pas exister en France de grandes implantations de panneaux solaire thermiques. Cette remarque vaut également pour les climatisations à sorption.

Le scénario 3 constitue la solution géothermique de référence en ce qu'elle représente une solution de repli qui bénéficie de quelques retours sur expérience mais encore peu documentés.

A noter que, pour ces trois scénarios, il n'est pas prévu d'appoint en raison de la décentralisation de machineries thermodynamiques le long du réseau d'énergie thermique ; ce qui peut conférer des capacités d'appoint ou de secours selon les événements. Ce point est à détaillé par lors des études de détail.

A noter également qu'une opportunité de recourir à des sources d'énergie thermiques fatales, d'origine industrielle, peut être envisagée si le projet venait à ne pas pouvoir être retenu.

3.1. Description de la solution de référence

Du fait de fortes demandes en climatisation, la "**solution classique**" pouvant être mise en place consiste en des machineries thermodynamiques de type thermofrigopompes fonctionnant sur aéroréfrigérants ; la question d'une machinerie centralisée ou de machineries décentralisées, avec ou sans réseau d'énergie, restant en suspens.

A des fins de comparaisons, les grandeurs ci-dessous se réfèrent à des solutions conventionnelles bien non optimisées pour l'application envisagée. Elles recourent au gaz pour le chauffage et l'ECS et à des groupes froids à compression électrique pour la climatisation.

3.2.1. Comparatif énergétique

Tableau unique : Chauffage, ECS et Climatisation

Répartition de l'énergie*		Solution classique de référence (MWh/an)	Solution géothermique de référence (Scénario 3)		
			PAC (MWh/an)	Appoint (MWh/an)	Géothermie*** (MWh/an)
Consommation d'énergie	Gaz	<i>Chauff. :1500 à 1600 ECS :400 à 450</i>		<i>Sans objet</i>	
	Electricité	400 à 500	Mode chaud 380 Mode froid :220	<i>Sans objet</i>	Mode chaud 47 Mode froid :47
Productions d'énergie		<i>Chauffage : 1 468 ECS : 377 Froid : 1 217</i>	<i>Chauffage : 1 468 ECS : 377 Froid : 1 217</i>	<i>Sans objet</i>	<i>Puisage hivernal : 1 200 Injection estivale :1 200</i>

* Combustibles y compris l'électricité nécessaire au fonctionnement des installations

** Combustibles : Consommations PCI

*** Géothermie : Consommation : consommation électrique pompes ou circulateurs

Production : production d'énergie entrée PAC

Note de compréhension : Les grandeurs relatives au scénario 3 ci-dessus optimisent les bénéfices énergétiques pouvant résulter des capacités de stockage de court-terme en intersaison lorsqu'il y a alternance rapide entre demande de chauffage et demande de climatisation. Les périodes concernées sont Avril/Mai au printemps et Octobre en automne.

Le concepteur pourra préférer l'exploitation du champ de sondes géothermiques à l'installation de certaines capacités tampon au niveau des machineries thermodynamiques ; ce qui reste sans incidence sur le dimensionnement des équipements géothermiques. Ci-dessous, peuvent donc être sous-estimées les énergies échangées avec le champ de sondes géothermiques. Les quantités d'énergie thermique en jeu sont de l'ordre de 5% de l'énergie stockée ou déstockée.

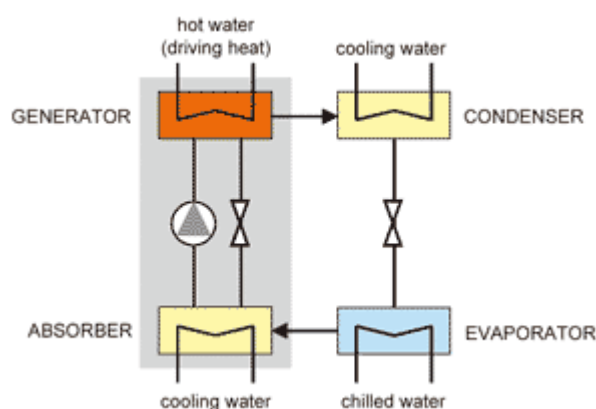
Annexe 5

Compléments relatifs aux machines à sorption

1- Refroidissement par Absorption : couple réfrigérant / liquide absorbant (Source Tupin, 2010)

La compression thermique est obtenue en utilisant un couple réfrigérant / liquide absorbant, et une source de chaleur qui remplace la consommation électrique du compresseur mécanique. Pour de l'eau glacée au-dessus de 0°C, comme c'est le cas en climatisation, le couple eau / bromure de lithium (H₂O/LiBr) qui est le plus souvent utilisé, l'eau étant alors réfrigérant.

La plupart des systèmes utilisent une pompe à solution, très faiblement consommatrice d'électricité. Dans un système H₂O/LiBr, la cristallisation de la solution doit être évitée par un contrôle interne de la température du circuit de refroidissement. Ce problème n'existe pas avec un couple comme le NH₃/H₂O où le réfrigérant est l'ammoniac.



Principe d'une installation de refroidissement par absorption

La "production de froid" est basée sur l'évaporation du réfrigérant dans l'évaporateur à très basse pression. La vapeur d'eau est alors absorbée dans l'absorbeur, contribuant à la dilution de la solution H₂O / LiBr. L'efficacité du processus d'absorption nécessite un refroidissement de la solution.

La Solution est pompée en continu dans le générateur où elle est chauffée (chaleur motrice). La vapeur d'eau ainsi générée est envoyée dans le condenseur, où elle se condense. L'eau liquide, après passage dans une vanne de détente, retourne ensuite à l'évaporateur.

Les puissances frigorifiques des machines à absorption peuvent atteindre couramment plusieurs centaines de kW froid. Elles sont généralement alimentées par un réseau de chaleur, de la chaleur résiduelle ou une cogénération. La température de la source chaude est généralement au-dessus de 80 °C pour des machines à simple effet, avec un COP entre 0,6 et 0,8. Les machines double effet, utilisant la chaleur motrice sur 2 niveaux, nécessitent des températures supérieures à 140 °C, pour des COP pouvant atteindre 1,2.

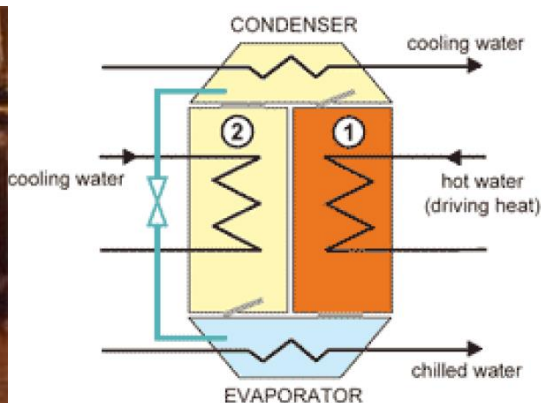
Quelques machines à absorption de capacité inférieure à 50 kW sont disponibles. Pour le rafraîchissement solaire à absorption, ce sont souvent ces petites machines qui sont utilisées. Une machine, développée récemment pour des petites capacités, permet un fonctionnement à charge partielle, avec une température de 65 °C et un COP d'environ 0,7; ce qui la rend particulièrement intéressante pour une alimentation solaire. Ceci montre le fort potentiel d'amélioration qui existe encore pour ce type de machines.

2- Refroidissement par Adsorption : réfrigérant/solide adsorbant (Source Tupin, 2010)

Au lieu d'une solution liquide comme pour la technique de l'absorption, un matériau solide (un adsorbant) est utilisé. Les systèmes disponibles sur le marché utilisent usuellement l'eau comme réfrigérant et, généralement, du silica-gel comme adsorbant. La machine comprend deux compartiments remplis d'adsorbant (compartiments 1 et 2 de la figure ci-dessous), un évaporateur et un condenseur.

L'adsorbant du premier compartiment est régénéré par chauffage (eau chaude solaire par exemple), la vapeur d'eau ainsi générée étant envoyée dans le condenseur où elle se condense. L'eau liquide, via une vanne de détente, est envoyée à basse pression dans l'évaporateur où elle s'évapore (phase de « production de froid »).

L'adsorbant du compartiment 2 maintient la basse pression en adsorbant cette vapeur d'eau. Ce compartiment doit être refroidi pour entretenir le processus d'adsorption. Lorsque la « production de froid » diminue (saturation de l'adsorbant en vapeur d'eau), les fonctions des deux compartiments sont permutées par ouverture et fermeture de clapets. Actuellement, seuls quelques fabricants proposent ce type de machines à adsorption.



Principe d'une installation de refroidissement par adsorption

Avec une température de source chaude d'environ 80°C, ces systèmes obtiennent des COP d'environ 0,6 mais peuvent fonctionner jusqu'à des températures d'environ 50 °C.

La capacité typique des machines va de 50 à 500 kW froid.

La robustesse de ces machines à adsorption est un atout. Il n'y a, d'autre part, aucun danger de cristallisation et donc, pas de contrainte sur la température intermédiaire de refroidissement. Il n'y a pas de pompe à solution; les consommations électriques sont donc particulièrement réduites. Seuls leur taille et leur poids élevés représentent un inconvénient.

Il existe cependant un potentiel important d'amélioration au niveau des échangeurs dans les compartiments d'adsorption, et donc de réduction de poids et de volume pour les futures générations de machines à adsorption.

D'autre part, étant donné le faible nombre de machines produites, le coût des machines à adsorption est actuellement élevé.

3. Climatisation à sorption - Eléments de performance (Source Fraunhofer ISE)

Phase physique du matériaux de sorption	Absorption Liquide			Adsorption Solide		
Matériaux de sorption	Eau	Bromure de lithium		Zéolite	Silica Gel	Chlorure de lithium
Frigorigène	Ammoniac	Eau	Eau	Eau	Eau	Eau
Cycle	Simple effet	Simple effet	Double effet	Simple effet	Simple effet	Simple effet
EER	0.5 à 0.75	0.65 à 0.80	1.1 à 1.4	0.5 à 0.75	0.5 à 0.75	0.5 à 0.75
Température de l'eau	60°C à 100°C (120 °C à 180°C)	70°C à 100°C	140 °C à 180°C	65 °C à 90°C	65 °C à 90°C	65 °C à 90°C

4. Climatisation à sorption – quelques exemple de modèles sur le marché

Marque	Pays	Modèle	Puissance frigorifique par unité (kW)	Régime frigorifique (°C/°C)	Resource thermique (°C/°C)	Refroid. (°C/°C)	COP	Sorption	Couple
AGO	Allemagne	Congelo 50	50	12/6	95/85	25/30	0.61	Absorption	Ammoniac Eau
Climatwell	Suède	CW10 CW20	10 20	20/15	83/73	27/34	0.68	Absorption	Eau LiCl
EAW Shüco	Allemagne	SE15	15	17/11	90/80	30/35	0.71	Absorption	Eau LiBr
		SE30	30	15/9	86/76	27/22	0.75		
		SE50	54	15/9	86/76	27/22	0.75		
Invensor	Allemagne	LCT 10	10	18/15	72/66	27/31.5	0.60	Adsorption	Eau Zéolithe
		HTC 18	18	18/14	85/76.5	27/34.5	0.55		
Jiangsu Huineg	Chine	RXZ11 RXZ23 RXZ35	11 23 35	15/10	90/85	30/35	0.7	Absorption	Eau LiBr
Pink	Autriche	PC14 PC19	14 19	12/6	85/78	24/30	0.63	Absorption	Ammoniac Eau
Sakura	Japon	... 2AA240 2AB675 ...	844 3 062	21/16 32/25.3	65/55 71/59.5	30/36.5 32/38	0.4	Absorption	Eau LiBr
Shuangliang	Chine	SWAC10	10	15/10	85/79	30/35	0.39	Adsorption	Eau/silicagel
Sortech	Allemagne	eCoo 2.0 eZea	16 13	8 à 21	50 à 95 75 à 95	22 à 40	<0.6 <0.53	Adsorption	Eau/silicagel Eau/Zéolithe
Termax	Allemagne	LT 0.5 LT 1	17.5 35	12/17	91/85	29/47	0.78	Absorption	Eau LiBr
Tranter Solarice	Allemagne	XS 30 WS 50	30 50	2/-3 16/10	95/85	24/31 20/27	0.5 0.6	Absorption	Ammoniac Eau
Yasaki	Japon	WFC-SC 5 WFC-SC10	17.5 35	12.5/7	88/83	31/35	0.7	Absorption	Eau LiBr

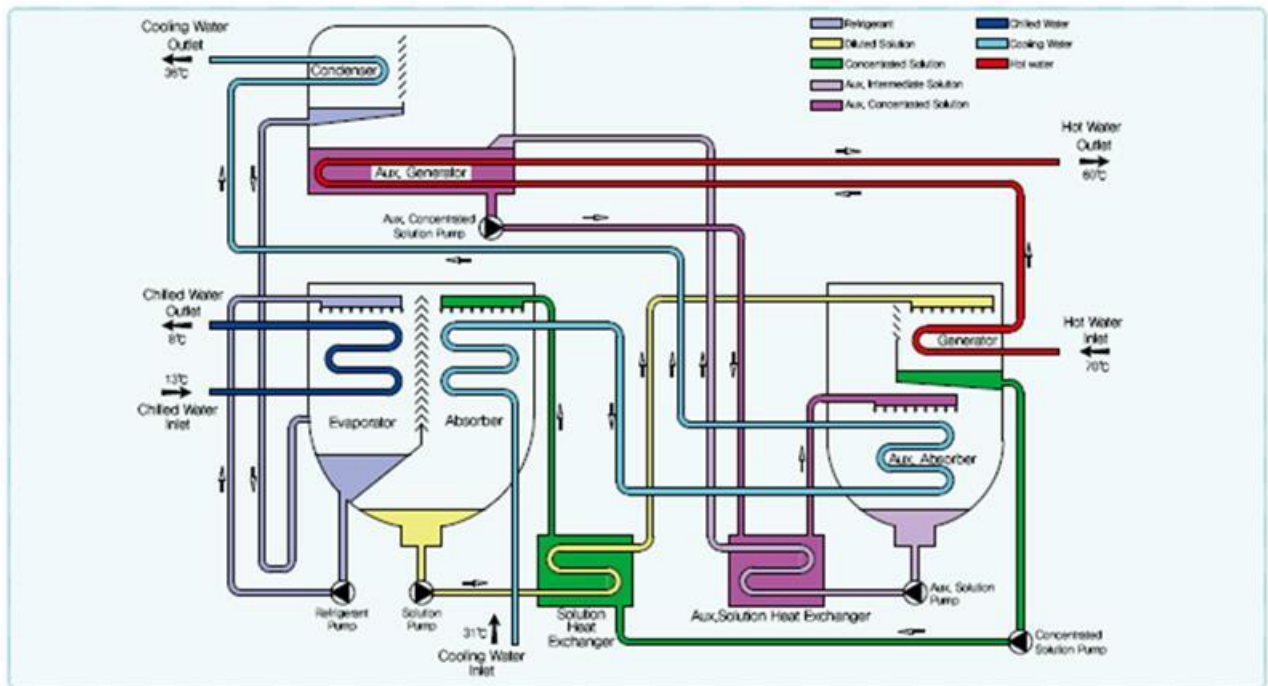
5. Exemple de gamme de machines (Extrait du catalogue SAKURA)

2AA Series [Waste Heat Recovery (Single Effect Hot Water) Driven Type 75~375RT]

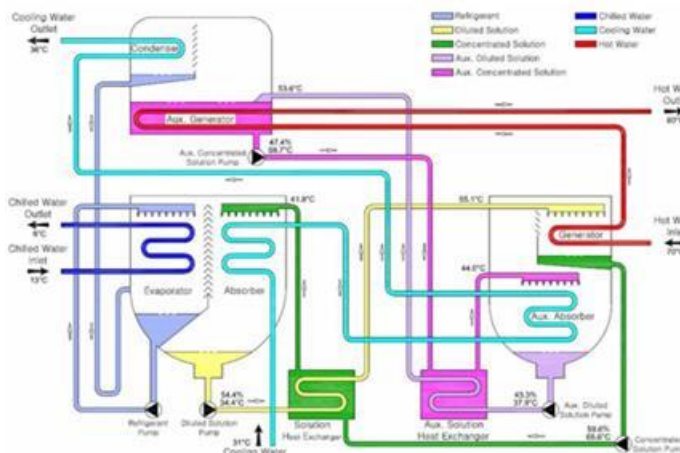
Model		Unit	2AA075	2AA090	2AA110	2AA135	2AA155	2AA180	2AA210	2AA240	2AA270	2AA300	2AA340	2AA375	
Cooling Capacity		kW	264	316	387	475	545	633	738	844	949	1,055	1,196	1,319	
		usRT	75	90	110	135	155	180	210	240	270	300	340	375	
Chillrd Water	Inlet Temp./Outlet Temp.	℃	13 / 8												
	Flow rate	m³/h	45.4	54.4	66.5	81.6	93.7	109	127	145	163	181	206	227	
	Pressure Drop	mH ₂ O	3.7	3.8	4.6	4.8	4.3	4.6	3.2	3.4	3.4	3.5	3.1	3.2	
	Connection	mm	80		100		125			150			200		
Cooling Water	Inlet Temp./Outlet Temp.	℃	31 / 36												
	Flow rate	m³/h	156	188	229	281	323	375	438	500	563	625	709	782	
	Pressure Drop	mH ₂ O	4.7	5.0	12.0	13.0	13.0	13.4	7.1	7.1	7.3	7.2	7.1	7.2	
	Connection	mm	150		200			250			300				
Hot Water	Inlet Temp./Outlet Temp.	℃	70 / 60												
	Flow rate	ton/h	55.1	66.1	80.7	99.1	113.8	132.1	154.1	176.2	198.2	220.2	249.6	275.3	
		m³/h	56.3	67.6	82.6	101.4	116.4	135.2	157.7	180.2	202.8	225.3	255.3	281.6	
	Pressure Drop	Shell	mH ₂ O	5.8	6.5	5.3	6.1	6.7	7.1	5.9	6.2	5.6	5.7	5.5	5.7
		Control Valve	mH ₂ O	1.9	2.7	4.0	2.9	3.8	5.2	3.1	4.1	5.1	1.4	1.8	2.2
	Connection	mm	100		125			150		200					
Control Valve	mm	100			125			150			200				
Electric	Power source	-	3ø, 400V, 50Hz												
	Ref. Pump	kW [A]	3.0 [11.0]				3.8 [12.6]				4.8 [15.2]				
	Abs. Pump	kW [A]	0.2 [1.1]		0.3 [1.5]		0.4 [1.6]								
	Purge Pump	kW [A]	0.4 [1.5]												
	Control Panel	kW [A]	0.2 [0.5]												
	Total kW	kW	3.8	3.8	3.9	3.9	4.8	4.8	4.8	4.8	5.8	5.8	5.8	5.8	
	Total Ampere	A	14.1	14.1	14.5	14.5	16.2	16.2	16.2	16.2	18.8	18.8	18.8	18.8	
Size	Length (L)	mm	2,658		3,678		3,720		4,740		4,776		4,880		
	Width (W)	mm	2,281				2,623				2,795		3,022		
	Height (H)	mm	2,084				2,257				2,540		2,838		
Weight	Rigging	ton	4.8	5.1	6.3	6.6	7.9	8.3	9.7	10.1	12.4	13.0	14.9	15.4	
	Operation	ton	5.6	5.8	7.3	7.7	9.2	9.8	11.4	12.0	14.7	15.5	17.8	18.6	
Space for Tube Replacement		mm	2,400		3,400			4,500							

SAKURA – Série 2AA pour valorisation de l'énergie fatale à basse température, Moitié inférieure de la gamme allant jusqu'à 1 300 kW de puissance frigorifique

6. Exemple de fiche de cas – Climatisation à absorption (source SAKURA)



SAKURA – Série 2AA pour récupération de l'énergie fatale à basse température, de 264 kW à 1 300 kW de puissance frigorifique



Date : December 2009

Location : Youngpoong, Zinc, Bonghwa

Model : 2AA240

Cooling Capacity : 240usRT (844kW)

No. : 1 unit

Conditions

- Chilled Water : 21 / 16°C
- Cooling Water : 30 / 36.5°C
- Hot Water : 65 / 55°C

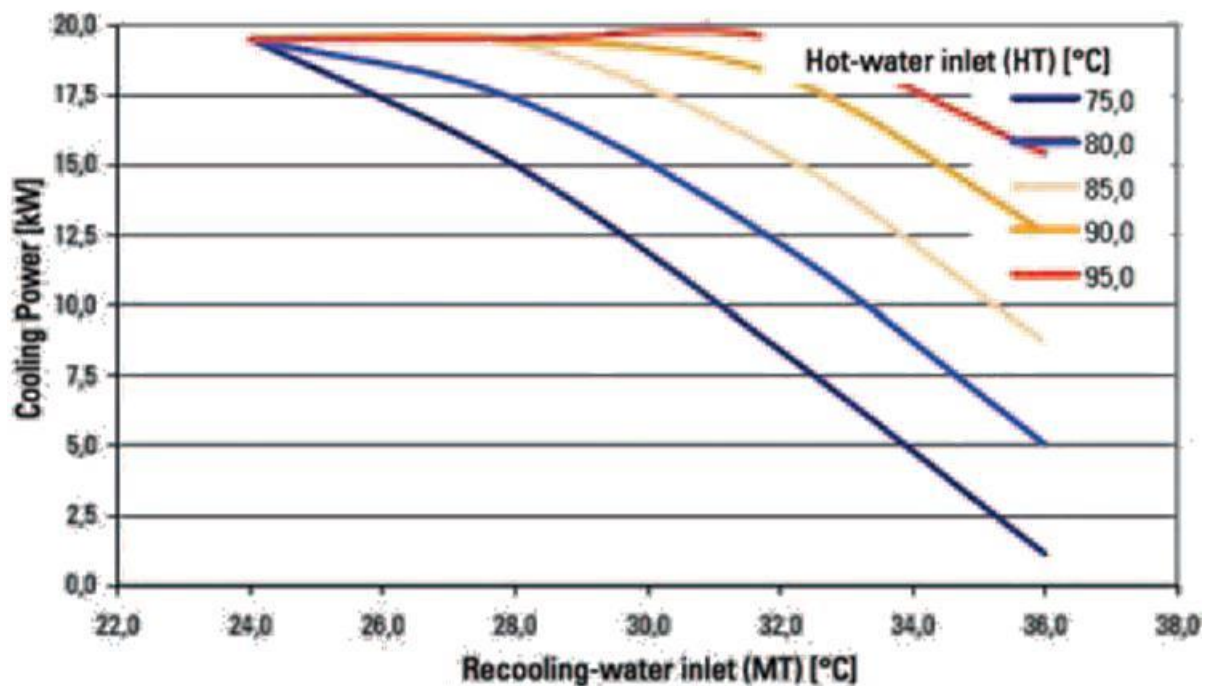
Features

- ✓ Absorption chiller driven with 70°C hot water
- ✓ 2 Lift Absorption Cycle
- ✓ COP : 0.4

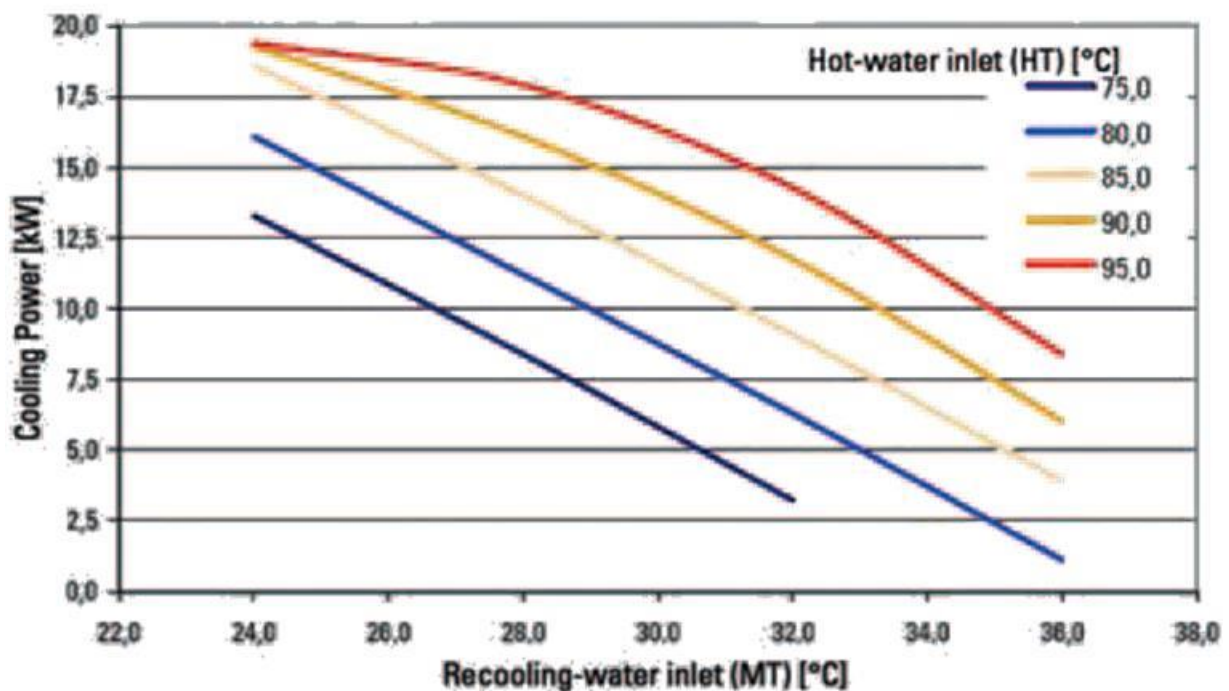


7. Absorption : Exemple d'efficacité énergétique pour une utilisation en plafond rafraîchissement (vue du haut) et ventilo-convecteur (vue du bas)
(Source : www.pink.co.at)

Cooling Power / PinkChiller - PC19 Cold-water (LT) 18/15°C



Cooling Power / PinkChiller - PC19 Cold-water (LT) 12/6°C

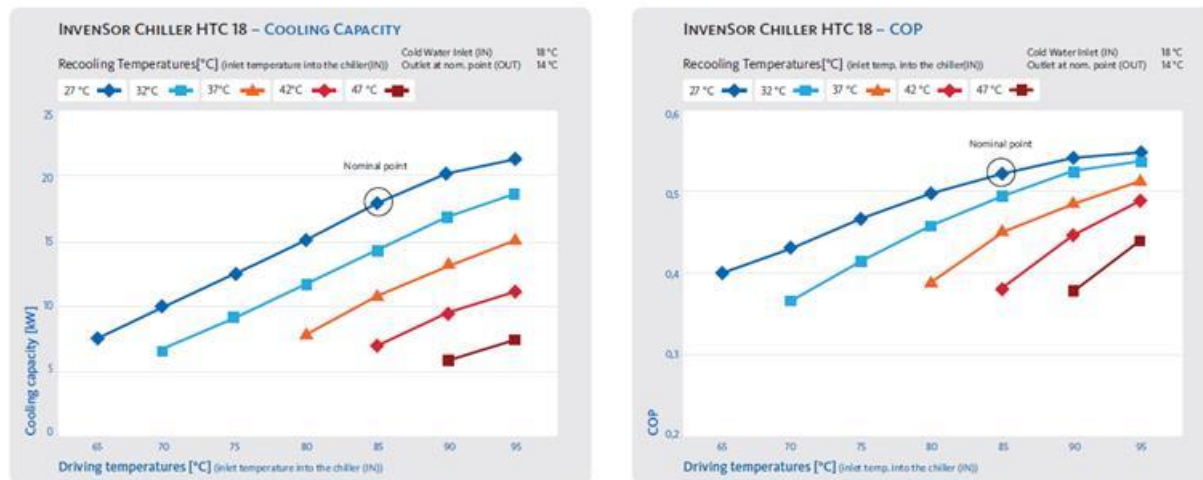


8. Absorption : Sensibilité au mode d'utilisation

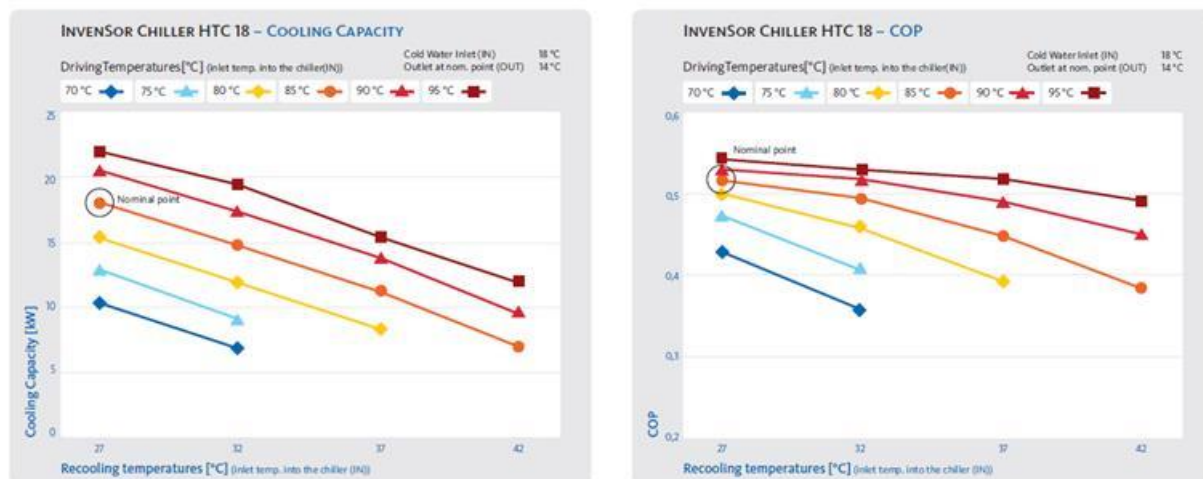
Performance data		Unit	Minus-Cold	Fan-Coils	Cooling ceiling
Cold water circuit (LT)	Power	kW	12,3	18,6	19,5
	Temperatures in/out	°C	0/-3	12/6	18/15
	Flow rate	m³/h	3,5	2,7	5,6
	Connection	Internal tread	1"	1"	1"
Hot water circuit (HT)	Power	kW	26	30	27
	Temperatures in/out	°C	95/88	85/78	75/68
	Flow rate	m³/h	3,2	3,6	3,3
	Connection	Internal tread	1"	1"	1"
Heat rejection circuit (MT)	Power	kW	38	49	47
recooling	Temperatures in/out	°C	24/30	24/30	24/30
	Flow rate	m³/h	5,5	6,9	6,7
	Connection	Internal tread	6/4"	6/4"	6/4"

9. Adsorption : Exemple de point de fonctionnement à haute température (Source : Invenzor, modèle HTC 18 - 18 kW)

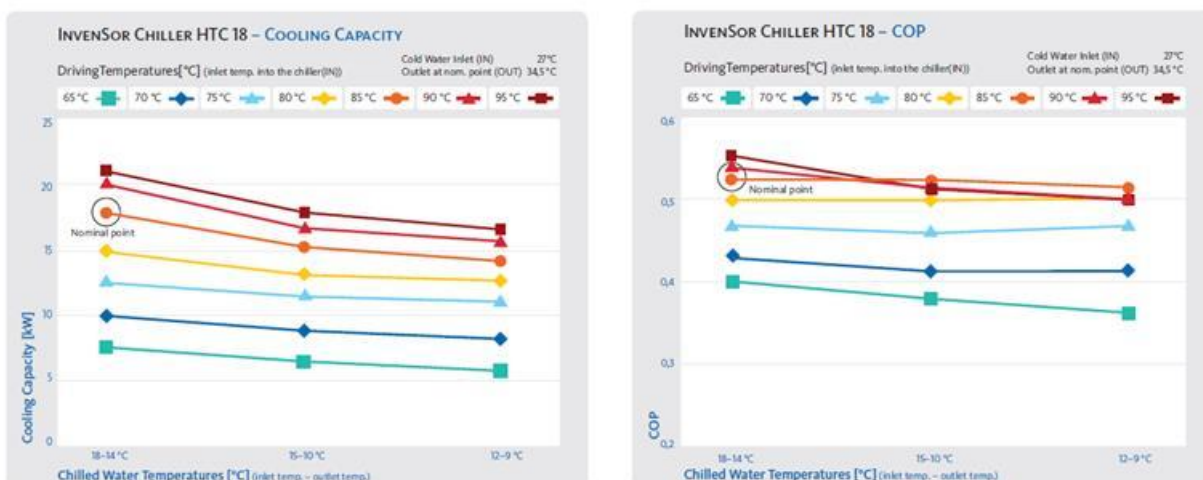
Capacity and COP at different temperatures of recooling and driving energy



Capacity and COP at different temperatures of driving energy and recooling



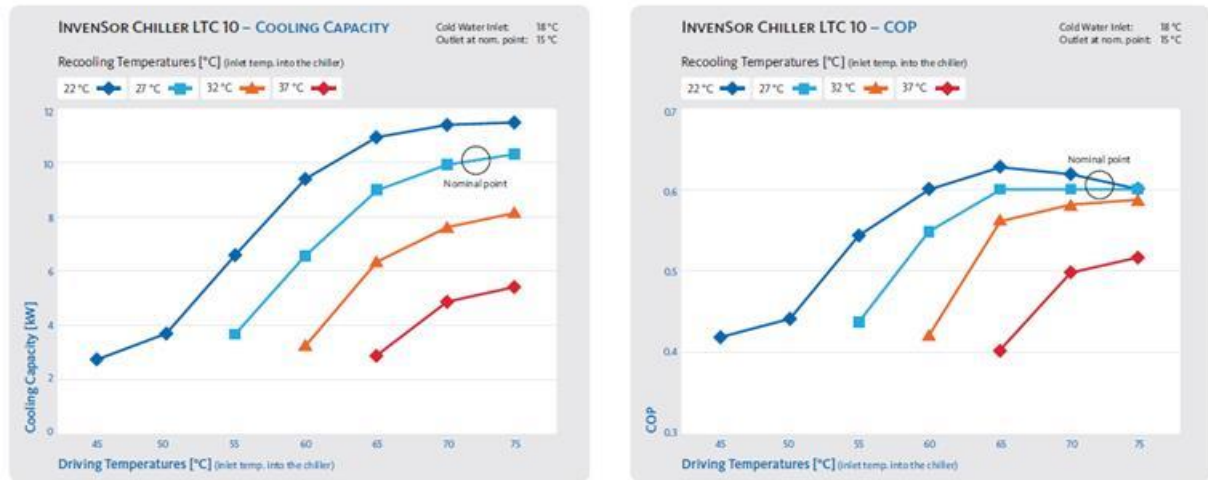
Capacity and COP at different temperatures of driving energy and chilled water



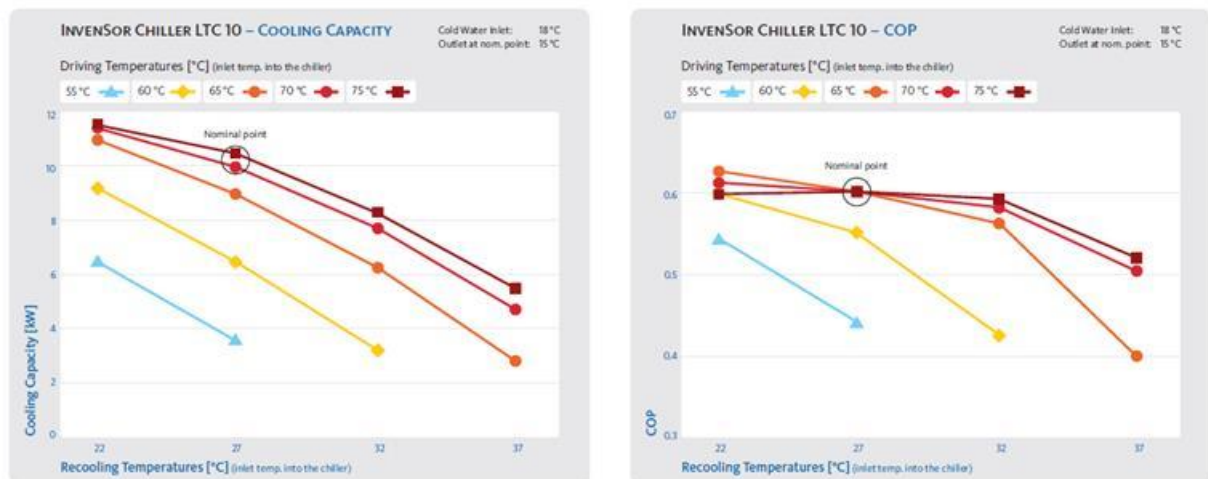
10. Adsorption : Exemple de point de fonctionnement à moyenne température

Source : InvenSor, modèle LTC 10 (10 kW)

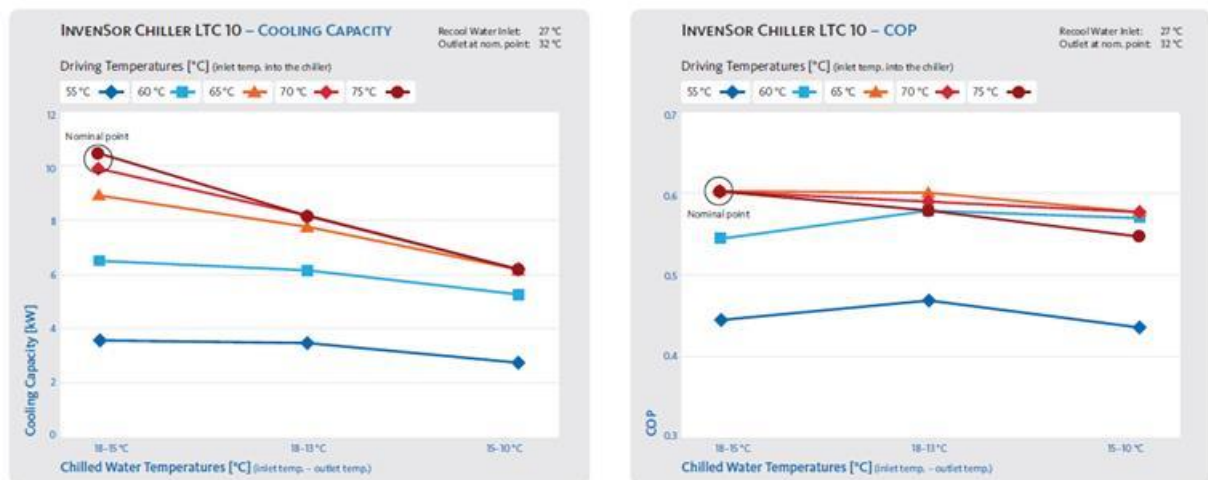
Capacity and COP at different temperatures of recooling and driving energy



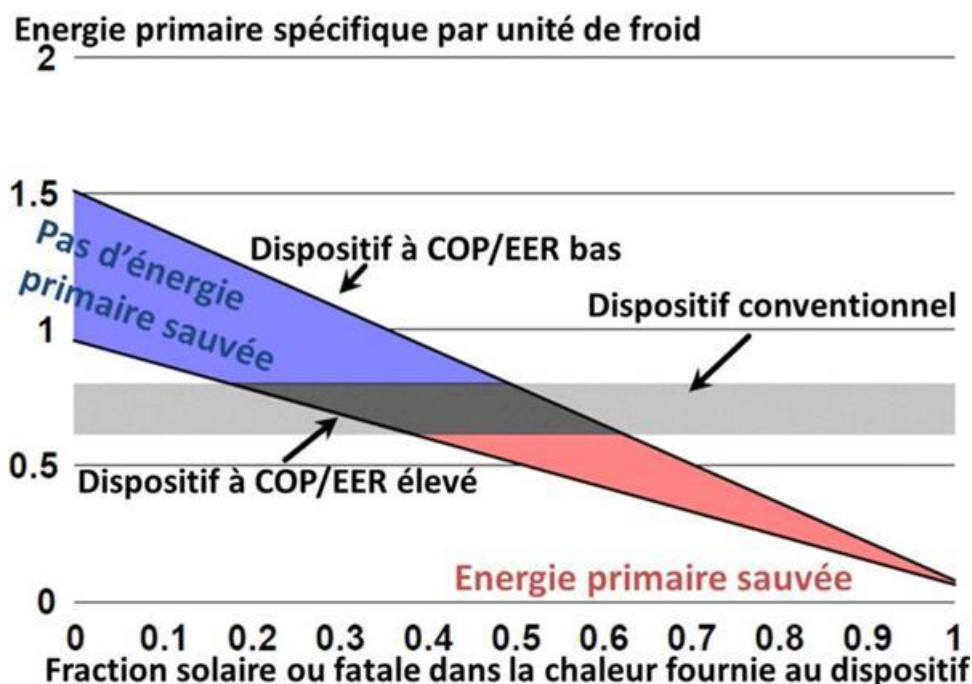
Capacity and COP at different temperatures of driving energy and recooling



Capacity and COP at different temperatures of driving energy and chilled water



11. Eléments de perspective économique



Relation entre la fraction renouvelable dans un dispositif à sorption et l'énergie primaire

PRIORITES DE RECHERCHE	ETAT DE L'EXISTANT	OBJECTIFS / HORIZON DE TEMPS
Sur le capteur : Surfaces, traitements, revêtements, matériaux, design, procédés de fabrication innovants	Coût d'un champ de capteurs fourni posé de 600 €/m ² (collectif)	2020 : réduction de 50 % des coûts (à performance identique voire supérieure)
Sur le système complet : Réduction des coûts	15 à 20 c€/kWh	2015 : 12 c€/kWh 2020 : 7 à 10 c€/kWh
Développement / commercialisation de systèmes packagés intégrant des développements « composant »	CESI en kit	2020 : 100 % de solutions packagées pour les CESI et les SSC ; 80 % de solutions packagées pour l'ECS collective
Développer des systèmes de raccordement hydrauliques et de plomberie peu onéreux et standardisés, simples à raccorder	Pas de standard	2020 : plus de 80 % de part de marché pour un type de raccord standard
Développer des systèmes de montage et de fixation standardisés peu onéreux et facile à installer	Pas de standard	2015 : existence d'une norme, 2020 : plus de 80 % de part de marché pour un système de montage standardisé, facile, rapide à monter

Perspectives économiques (Source CGEDD, décembre 2013)



Centre scientifique et technique
3, avenue Claude-Guillemin
BP 36009
45060 – Orléans Cedex 2 – France
Tél. : 02 38 64 34 34 - www.brgm.fr

Direction régionale Provence-Alpes-Côte d'Azur
117 Avenue de Luminy
BP 168
13276I – Marseille – France
Tél. : 04.91.17.74.77.