Concept Energétique Territorial pour le site « Verdan », Yverdon



Ville d'Yverdon-les-Bains

Version 01, mars 2025

focus-E Sàrl, Route de la Scie 48, 1278 La Rippe, tél. : 022 367 17 63, courriel : cweber@focus-e.ch, www.focus-E.ch

Donneur d'ordre :	Flexos SA c/o FIDOFFICE SA A l'att. M. Christophe Germain Chemin Neuf 13 1163 Etoy et Ville d'Yverdon-les-Bains Service de l'Urbanisme et des Bâtiments A l'att. Monsieur Julien Woessner Avenue des Sports 14 Case postale 7416 1401 Yverdon-les-Bains
Mandataire :	focus-E Sàrl Céline Weber Route de la Scie 48 1278 La Rippe cweber@focus-e.ch
Projet :	202405
Version :	01
Date :	28 mars 2025

Table des matières

Résumé 2
1 Introduction 5
2 Cadre légal 6
2.1 Niveau fédéral 6
2.2 Niveau cantonal 6
2.3 Niveau communal 10
3 Etat des lieux 13
3.1 Qualité de l'air (nouveau) 13
3.2 Infrastructures existantes 14
3.2.1 Réseau d'eaux usées (nouveau) 14
3.2.2 Réseau de gaz 16
3.2.3 Réseaux thermiques 16
3.3 Autres projets d'aménagement du territoire 17
4 Analyse des futurs besoins énergétiques 19
5 Analyse des ressources énergétiques disponibles 27
5.1 Energie solaire 27
5.2 Géothermie 30
5.3 Eaux de source 34
5.4 Bois 34
5.5 Air 37
5.6 Rejets thermiques 38
5.7 Lac de Neuchâtel 38
5.8 Energie éolienne 41
5.9 Synthèse des ressources 41
6 Scénarios d'approvisionnement 42
6.1 Scénario « de base » 42
6.2 Scénario « géothermie » 42
6.3 Scénario « bois » 44
6.4 Scénario « air » 44
6.5 Scénario « CAD » 45
7 Comparaison entre les scénarios 47
7.1 Critères environnementaux 47
7.2 Critères économiques 50
8 Synthèse et recommandations 54

Résumé

Le projet de construction comprendra 77'500m^2 de SBP neuve, dont 61'350m^2 (soit près de 80%) dédiés à diverses activités et commerces, et 15'850m^2 (soit environ 20%) dédiés à du logement.

	Catégorie SIA	SRE totale par bâtiment [m^2]
Logements	I	16 150
Bureaux	III	17 893
Utilité publique / loisir	IV	2 150
Petits commerces	V	0
Commerces	V	3 100
Artisanat / industries	IX	35 969
Installations sportives	XI	2 238
TOTAL		**77 500**

SRE par type d'affectation

Les consommations attendues par bâtiment sont indiquées dans les tableaux ci-dessous, pour trois types de construction, ou d'enveloppes de bâtiment, différents (construction respectant la SIA 380/1, construction HPE et construction THPE) :

Bâtiment	Chauffage			ECS	Puissance chaud		
	SIA [MWh/an]	HPE [MWh/an]	THPE [MWh/an]	[MWh/an]	SIA [kW]	HPE [kW]	THPE [kW]
A1	486	389	308	79	314	252	199
A2	223	178	141	38	156	125	99
A3	316	252	200	52	216	173	137
A4	177	142	112	29	111	89	70
B1	339	271	217	50	195	156	124
B1'	244	195	155	40	157	126	99
B2	345	276	221	219	187	149	119
B3	316	253	202	75	196	157	125
B4	395	316	253	95	250	200	160
C1	167	134	105	94	140	112	88
C2	126	101	80	71	105	84	66
C3	154	123	97	83	134	107	84
D	60	48	39	10	41	33	27
TOTAL	**3 348**	**2 678**	**2 129**	**933**	**2 201**	**1 761**	**1 397**

Besoins en énergie et puissance pour le chaud (inclus l'eau chaude sanitaire, ECS)

Bâtiment	Energie froid SIA/HPE/THPE [MWh/an]	Puissance froid SIA/HPE/THPE [kW]	Electricité - techniques du bâtiment [MWh/an]	Electricité - équipements SIA [MWh/an]	HPE [MWh/an]	THPE [MWh/an]
A1	142	190	228	240	240	192
A2	81	101	115	105	105	84
A3	101	126	156	153	153	122
A4	55	79	82	86	86	69
B1	30	42	126	189	189	152
B1'	73	98	114	120	120	96
B2	55	78	102	103	103	82
B3	0	0	136	182	182	146
B4	9	12	171	213	213	170
C1	0	0	125	90	90	72
C2	0	0	94	68	68	54
C3	10	9	118	80	80	64
D	0	0	16	9	9	7
TOTAL	**555**	**735**	**1 585**	**1 637**	**1 637**	**1 310**

Besoins en énergie et puissance pour le froid, besoins en énergie pour l'électricité

Au niveau des ressources énergétiques, trois types d'énergie présentent un potentiel intéressant : la géothermie, avec sondes ou avec un doublet sur l'aquifère du Crétacé, situé à 750m sous le quartier de Verdan, le bois et l'air. En ce qui concerne la géothermie sur l'aquifère du Crétacé, des études exploratoires doivent encore être réalisées, et cette ressource, si elle est confirmée, ne sera pas disponible avant 2030 environ. En comparaison avec d'autres ressources énergétiques, la géothermie de moyenne profondeur liée à la valorisation de l'énergie comprise dans l'aquifère du Crétacé, présenterait par contre l'avantage de performances environnementales excellentes, à l'image de la consommation d'énergie primaire (cf. tableau ci-dessous). Cas échéant, la géothermie de moyenne profondeur serait l'option la plus prometteuse au niveau environnemental, en revanche sa réalisation représenterait un défi logistique important eu égard au nombre de sondes requises. En ce qui concerne le bois, les particules émises par sa combustion, dans une zone qui est déjà largement urbanisée, n'en font pas la solution préférée a priori, mais elle ne peut pas être totalement écartée à ce stade. Enfin, en ce qui concerne l'air, il convient de préciser que le bruit, lié aux compresseurs des pompes à chaleur, représenterait un défi important (la mise en place de caissons d'insonorisation semble a priori nécessaire). Enfin, il convient de mentionner encore une potentielle connexion à l'un des réseaux de chauffage à distance (CAD) de la Ville d'Yverdon, mais cette option n'a pas pu être confirmée ou infirmée à l'heure de la rédaction du présent rapport.

Les consommations d'énergie primaires non renouvelable sont indiquées dans le tableau ci-dessous, pour des scénarios d'approvisionnement basés sur chacune des principales ressources (géothermie, bois et air), à savoir :

1. un scénario d'approvisionnement basé sur un chauffage à distance alimenté par un CAD local au bois (le CAD satisfaisant l'intégralité du chaud, le froid étant satisfait par des groupes froid à compression),
2. un scénario d'approvisionnement basé sur des pompes à chaleur sur l'air (pour le chaud et le froid, avec cependant l'incertitude liée aux problèmes de bruit),
3. un scénario d'approvisionnement basé sur un champ de sondes raccordé à une boucle d'anergie (les sondes satisfaisant presque intégralement le chaud et une partie du froid, le reste du froid étant satisfait par des groupes froid à compression),
4. enfin, un scénario dit « de base » est un scénario comprenant des chaudières à gaz pour le chaud et des groupes froid à compression pour le froid.

	Scénario				
Ressource mobilisée	de base	géothermie aquifère	géothermie sondes	bois	air
Gaz naturel	3 717	0	598	0	0
Sous-sol (géothermie)	0	0	0	0	0
Bois	0	0	0	291	0
Soleil (thermique)	24	0	0	0	24
Electricité PV	104	104	89	104	104
Electricité mix Yverdon	293	501	498	348	498
TOTAL [MWh/an]	**4 138**	**606**	**1 184**	**743**	**627**

Consommations d'énergie primaire non renouvelables pour chacun des scénarios, en fonction des agents énergétiques requis [MWh/an]

En termes économiques, le tableau ci-dessous donne un aperçu des investissements et des coûts de l'énergie. Remarque : Le scénario « géothermie » ne comprend que l'option avec sondes et non l'option avec valorisation de l'aquifère, cette dernière option ne pouvant être chiffrée pour le moment.

Scénario		de base	géothermie aquifère	géothermie sondes	bois	air
Investissement chaud	[CHF]	2 050 000	A définir	7 017 768	2 720 000	3 190 000
Investissement froid	[CHF]	890 000	A définir	455 056	890 000	890 000
Investissement électricité	[CHF]	570 000	A définir	570 000	570 000	570 000
TOTAL	[CHF]	3 510 000	A définir	8 042 824	4 180 000	4 650 000
Coût de la chaleur	[CHF/kWh]	0,14		0,26	0,15	0,18
Coût du froid	[CHF/kWh]	0,25		0,10	0,25	0,25
Coût de l'électricité	[CHF/kWh]	0,21		0,21	0,21	0,21

Coûts liés aux différents scénarios

1 Introduction

La présente étude concerne la mise à jour d'un premier concept énergétique territorial (CET), réalisé en 2018, pour le périmètre dit « Verdan » à Yverdon, regroupant les parcelles n°502, n°5'472, n°548 et n°5'250, situées entre la Route de Sainte-Croix, l'Avenue de Grandson et la Rue Edouard-Verdan (cf. figure ci-dessous). La mise à jour a été rendue nécessaire suite à des modifications importantes au niveau de la répartition des bâtiments et de la programmation globale du périmètre.

Le projet de construction comprendra 77'500m^2 de SBP neuve, dont 61'350m^2 (soit près de 80%) dédiés à diverses activités et des commerces, et 15'850m^2 (soit environ 20%) dédiés à du logement. Les bâtiments existants seront démolis.



Figure 1 : Périmètre d'étude

Le but du CET est de proposer des scénarios (stratégies) d'approvisionnement énergétique permettant de satisfaire les besoins énergétiques des futurs bâtiments, en valorisant au mieux les ressources énergétiques renouvelables et locales.

L'étude comprendra les sections suivantes :

1. Analyse du cadre légal, section 2 ;
2. Etat des lieux (qualité de l'air et infrastructures notamment), section 3 ;
3. Analyse des futurs besoins énergétiques, section 4 ;
4. Analyse des ressources énergétiques disponibles, section 5 ;
5. Proposition de scénarios d'approvisionnement, section 6 ;
6. Comparaison des scénarios proposées au point 5 à l'aide de critères environnementaux et économiques, section 7 ;
7. Synthèses et recommandations, section 8.

2 Cadre légal

Le cadre légal comprend l'analyse des lois en vigueur au niveaux fédéral, cantonal et communal. Ces lois ayant passablement évolué depuis la première version du CET datant de 2018, aussi bien au niveau fédéral que cantonal, la présente section a été ré-écrite pour tenir compte de ces modifications.

2.1 Niveau fédéral

La politique énergétique au niveau fédéral est basée, d'une part, sur diverses lois (loi sur l'énergie, loi sur l'approvisionnement électrique et loi sur le CO_2), et, d'autre part, sur des accords internationaux.

Au niveau des lois, ces dernières reposent sur :

1. La *Stratégie Energétique 2050* de la Confédération (adoptée par le peuple le 21 mai 2017 et entrée en vigueur le 1er janvier 2018), qui prévoit notamment la sortie du nucléaire et l'amélioration de l'efficacité énergétique (à l'aide du programme *Bâtiments* qui est renforcé, des incitations fiscales pour les rénovations, ou encore des prescriptions sur les appareils électriques).
2. La *Loi fédérale sur les objectifs en matière de protection du climat, sur l'innovation et sur le renforcement de la sécurité énergétique* (adoptée en juin 2023 et entrée en vigueur au 1er janvier 2024, en contre-projet indirect à l'initiative sur les glaciers), qui prévoit de réduire la consommation de pétrole et de gaz (sans néanmoins introduire d'interdictions), ainsi que d'octroyer des aides financières (p.ex. à l'innovation) pour encourager la transition écologique.
3. La *Loi pour un approvisionnement en électricité sûr basée sur les énergies renouvelables* (adoptée par le peuple en juin 2024 et qui entrée en vigueur au 1er janvier 2025), qui crée les bases qui permettront d'augmenter rapidement la production d'électricité indigène issue de sources d'énergies renouvelables telles que l'eau, le soleil, le vent ou la biomasse. Cette loi prévoit également des instruments d'encouragement ainsi qu'une facilitation de la revente d'électricité pour les particuliers qui en produisent eux-mêmes. En outre elle introduit au niveau fédéral l'obligation de mettre une installation solaire, par exemple photovoltaïque ou thermique, sur les toits ou les façades, lors de la construction de nouveaux bâtiments d'une surface déterminante de construction supérieure à 300 m^2.
4. La Loi sur le CO_2, approuvée par le Parlement en mars 2024 et entrée en vigueur au 1er janvier 2025, qui précise notamment la quantité d'émissions de CO_2 que la Suisse doit réduire à l'interne (par opposition aux mesures prises à l'étranger), soit deux tiers des émissions, ainsi que la trajectoire de réduction des émissions liées aux voitures, d'ici 2050, et qui sera calquée sur la trajectoire définie par l'UE.

Au niveau des accords internationaux, il faut citer bien entendu l'Accord de Paris, signé en 2015 et ratifié par la Suisse en 2017. Ce texte prévoit, notamment, une baisse de 50% des émissions de gaz à effet de serre d'ici 2030, par rapport au niveau de 1990.

2.2 Niveau cantonal

Loi vaudoise sur l'énergie (LVLEn)

La législation cantonale en matière d'énergie s'inscrit dans la suite logique de la législation fédérale, en renforçant les notions d'efficacité énergétique et de valorisation des énergies locales renouvelables.

Parmi les principaux articles qui sont importants dans le cadre du présent CET, il faut notamment citer [59]-[60] (version de 2022) :

A l'échelle de la commune :

1. Article 10, alinéa 1, de la LVLEn : *« Dans leurs activités, l'Etat et les communes exploitent l'énergie de façon rationnelle, économe et respectueuse de l'environnement. Ils y veillent notamment dans leurs opérations immobilières, de subventionnement, de participation et d'appels d'offres. »*

2. Article 10, alinéa 2, de la LVLEn : *« Ils* [l'Etat et les communes] *mettent en œuvre des démarches adéquates pour contribuer à la diminution des émissions de CO_2 et autres émissions. »*

3. Article 17, alinéa 1, de la LVLEn : *« L'Etat et les communes encouragent la production des énergies ayant recours aux agents indigènes et renouvelables. »*

4. Article 24, alinéa 1, de la LVLEn : *« L'Etat et les communes encouragent les installations de chauffage à distance, notamment lors de l'élaboration de leurs plans en matière d'aménagement du territoire. »*

5. Article 29, alinéa 1, de la LVLEn : *« Les communes encouragent l'utilisation des énergies renouvelables. Elles créent des conditions favorables à leur exploitation et peuvent accorder des dérogations aux règles communales à cette fin. »*

A l'échelle du bâtiment :

1. Article 28, alinéa 1, de la LVLEne : *« Les mesures de planification et de construction permettant de réduire la consommation d'énergie et de favoriser l'apport de sources d'énergies renouvelables dans les bâtiments sont déterminées par le règlement d'exécution. »*

2. Article 28, alinéa 3, de la LVLEne : *« Les exigences en termes de parts d'énergies renouvelables pour les besoins du bâtiment doivent être satisfaites par des mesures constructives prises sur le bâtiment lui-même sous réserve de l'utilisation d'un réseau de chauffage à distance lui-même alimenté majoritairement par des nouvelles énergies renouvelables ou des rejets de chaleur. Des exceptions sont possibles si un concept pérenne est mis en place à l'échelle d'un quartier ou pour une durée très limitée. Ces exceptions sont soumises à autorisation. »*

3. Article 28a, alinéa 1, de la LVLEne : *« Les constructions nouvelles sont équipées de sorte que la production d'eau chaude sanitaire, dans des conditions normales d'utilisation, soit couverte pour au moins 30% par l'une des ressources d'énergie suivantes :*
    a. *des capteurs solaires ;*
    b. *un réseau de chauffage à distance alimenté majoritairement par des énergies renouvelables ou des rejets de chaleur ;*
    c. *du bois, à condition que la puissance nominale de la chaudière excède 70 kW, hors des zones soumises à immissions excessives. »*

   Le règlement d'application prévoit cependant des exceptions lorsque les consommations d'eau chaude sanitaire sont faibles.

4. Article 28b, alinéa 1, de la LVLEne : *« Les constructions nouvelles sont équipées de sorte que les besoins d'électricité, dans des conditions normales d'utilisation, soient couverts pour au moins 20% par une source renouvelable. »* Selon la DIREN, par besoins d'électricité, il faut comprendre ici les besoins définis selon le tableau 10 de la norme SIA 380/1 de 2009 (Article 27 du RLVLEne), quand bien même cette version de la norme n'est plus en vigueur (la SIA ayant remplacé cette norme par une version plus récente).

5. Article 28b, alinéa 2, de la LVLEne : *« La consommation d'électricité pour alimenter une nouvelle installation de confort, pour des besoins de refroidissement et/ou d'humidification, respectivement de*

déshumidification, devra être couverte au moins pour moitié par une énergie renouvelable. La part renouvelable découlant des exigences de l'article 28a ne peut pas être prise en compte. »

6. Article 30b, alinéas 1 et 2, de la LVLEne : *« Les installations de chauffage au gaz des constructions nouvelles ne peuvent pas satisfaire plus de 80% des besoins admissibles pour le chauffage. Cette proportion descend à 60% pour les chauffages au mazout. »*
7. Article 30b, alinéa 6, de la LVLEne : *« Lors du remplacement d'une installation de chauffage par une nouvelle installation fonctionnant au gaz, au mazout ou au charbon, le propriétaire de l'installation doit faire établir à ses frais un certificat énergétique du bâtiment, tel que défini à l'article 39a. »*

Documents stratégiques et outils (nouveaux par rapport à 2018)

Conception cantonale de l'énergie (CoCEn)

En plus de sa législation cantonale, le canton de Vaud a élaboré, en 2019 sa **Conception cantonale de l'énergie** (CoCEn 2019)[1]. La CoCEn 2019 est un document stratégique par lequel le Conseil d'Etat pose les bases de la politique énergétique qu'il entend développer, en tenant compte des orientations découlant de la politique énergétique fédérale. Elle vise à définir, pour le canton de Vaud, la vision à long terme, les objectifs et les champs d'actions prioritaires à engager pour répondre aux défis posés par la transition énergétique et la sécurité d'approvisionnement énergétique (Figure 2 et Figure 3) [50]. La vision énergétique à long terme du canton de Vaud prévoit de [51] :

- Couvrir 35% de la consommation d'énergie finale vaudoise par une production d'énergie renouvelable vaudoise en 2030[2], puis 50% en 2050 ;
- Réduire la consommation d'énergie finale dans l'habitat de 7% en 2030[2] par rapport à l'année 2000 et de 14% en 2050, cf. Figure 3.

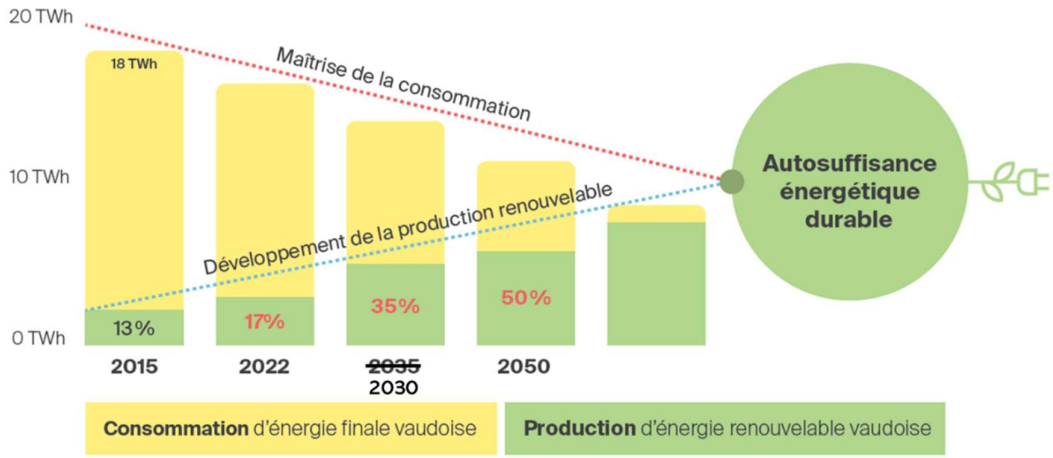


Figure 2 : Vision énergétique à long terme du canton de Vaud, selon la CoCEn [51]

[1] La CoCEn est revue une fois par législature. L'article 14, alinéa 1, lettre a de la Loi cantonale sur l'énergie du 16 mai 2006 [59] demande au Conseil d'Etat de «définir la politique énergétique cantonale par le biais de l'adoption d'une Conception cantonale de l'énergie et de l'adapter périodiquement, en principe une fois par législature.».

[2] Quand bien même la Figure 2 et la Figure 3 indiquent l'année 2035, les objectifs doivent bien être atteints en 2030 déjà, selon une décision du Conseil d'Etat d'avancer l'échéance.

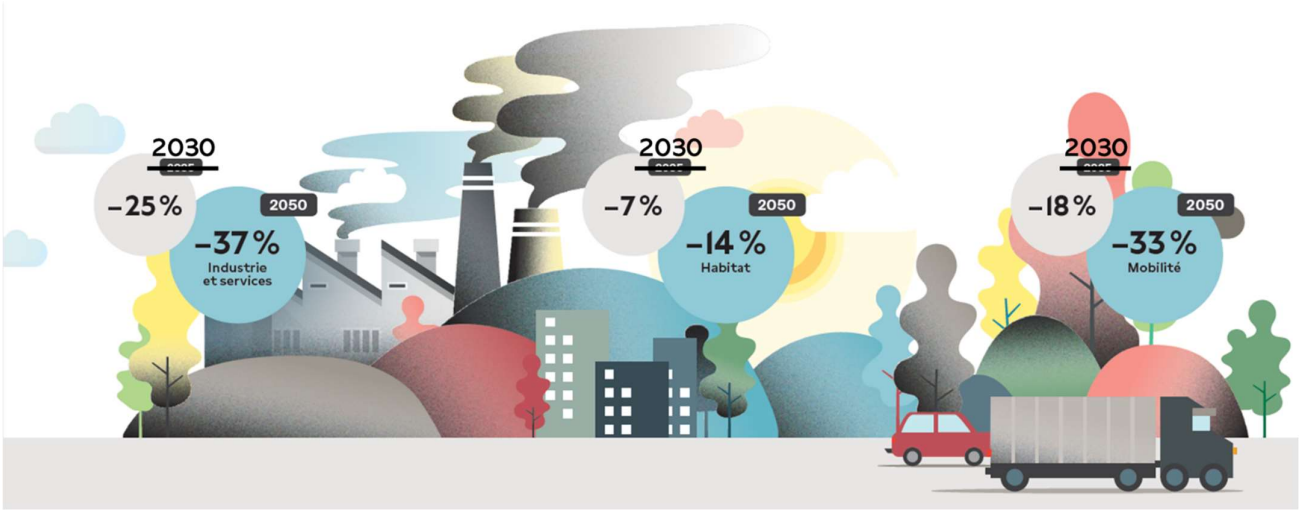


Figure 3 : Objectif de réduction de la Consommation d'énergie finale par habitant, selon la CoCEn [51]

La CoCEn n'a pas de portée contraignante, mais constitue un document de référence et de coordination pour les différentes autorités et administrations.

Plan climat

En juin 2020, le gouvernement vaudois a lancé le premier volet d'un tout nouveau **Plan climat**, un outil visant à aider le Canton à faire face à l'urgence climatique et à répondre aux accords de Paris [51]. Le Plan climat est un outil transversal, qui ne comprend pas que l'énergie (qui est largement traitée dans le cadre de la COCEn), mais également neuf autres domaines tels que, par exemple, l'agriculture, la mobilité, la santé, l'environnement, ou encore l'aménagement du territoire. Le Canton vise ainsi une réduction entre 50% et 60% des gaz à effet de serre d'ici à 2030 (par rapport à 1990), soit environ entre 40% et 50% par rapport à 2020, et la neutralité carbone territoriale d'ici à 2050. La Figure 4 indique l'évolution des émissions en équivalents de CO_2 pour le canton de Vaud. En plus de politiques publiques déjà engagées dans des domaines tels l'assainissement énergétique des bâtiments, le développement des transports publics ou la protection de la biodiversité, le Conseil d'Etat avait prévu, comme première impulsion, un investissement de 173 millions de francs pour les années 2021 à 2024. Dans son Programme de législature 2022-2027, le Conseil d'Etat a réaffirmé les objectifs du Plan climat (diminuer de 50% à 60% les émissions de gaz à effet de serre (GES) du territoire cantonal d'ici 2030 et viser la neutralité carbone au plus tard en 2050, cf. Figure 4) et annoncé sa volonté de renforcer son action, aussi bien en matière de réduction des émissions de gaz à effet de serre que d'adaptation aux changements climatiques. Pour ce faire, il a décidé d'injecter un montant supplémentaire de 200 millions de francs, qui viennent s'ajouter aux 173 millions qui étaient prévus pour la transition énergétique [53].

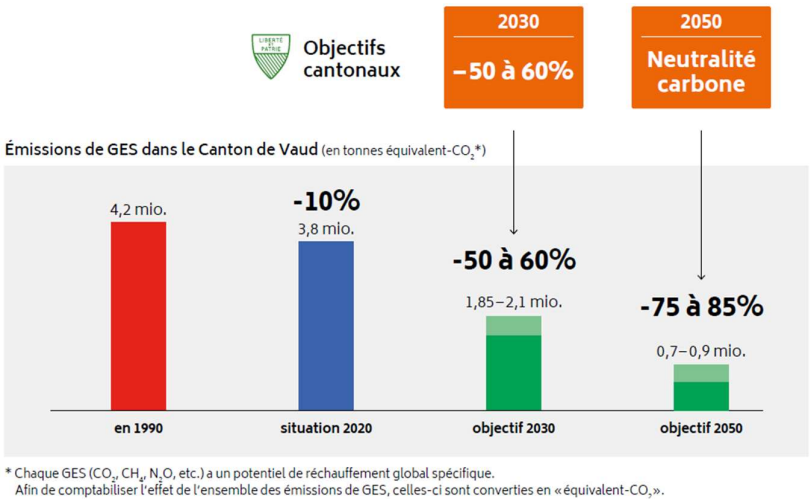


Figure 4 : Objectifs de réduction des émissions de gaz à effet de serre [51]

Initiative populaire cantonale "Pour la protection du climat"

Le 18 juin 2023, le peuple vaudois a accepté l'initiative populaire cantonale "Pour la protection du climat". Cette initiative va globalement dans le même sens que la Loi sur le climat, et demande notamment de [53] :

- Inscrire la protection du climat et de la biodiversité comme l'un des buts et principes de l'action de l'Etat (modification de l'art. 6 Cst–VD) ;
- Ancrer l'objectif de neutralité carbone sur le territoire vaudois d'ici à 2050 au plus tard, avec l'objectif pour l'Etat et les communes de réduire significativement les impacts climatiques négatifs de leurs politiques publiques, ainsi que l'obligation de se doter de plans d'action et d'objectifs intermédiaires pour 2030 et 2040 (nouvel art. 52b al. 1 et 2 et dispositions transitoires) ;
- Inciter les caisses de pension de droit public à concourir à l'atteinte de l'objectif de neutralité carbone, en exigeant qu'elles se dotent de stratégies indicatives en matière d'investissements responsables et respectueux du climat (nouvel art. 52b al. 3 et dispositions transitoires) ;
- Introduire l'obligation, pour l'Etat et les communes, de veiller à ce que les personnes morales dans lesquelles ils détiennent des participations élaborent des plans visant à réorienter les flux financiers vers des activités moins émettrices de gaz à effet de serre, avec des objectifs intermédiaires pour 2030 et 2040 (nouvel art. 162 al. 1 bis et dispositions transitoires).

2.3 Niveau communal

Si, comme la plupart des communes vaudoises, la Commune d'Yverdon-les Bains n'a pas, en matière d'énergie, de législation communale à proprement parler, elle n'en demeure pas moins une ville très pro-active dans le domaine. Labellisée Cité de l'Energie en 2010, puis Cité de l'Energie Label Gold en 2023, la Ville souhaite se montrer exemplaire quant à la consommation énergétique. Pour ce faire, elle s'est dotée de plusieurs outils :

1. *Plan Directeur des Energies* pour la Commune d'Yverdon-les-Bains [57],
2. *Plan climat 1ère génération* [55],

3. *Règlement sur la perception des indemnités communales liées à la distribution d'électricité* [2],
4. *Agenda 21* [1], réactualisé en 2020 par l'adoption d'une stratégie de durabilité à l'horizon 2030 - *Agenda 2030* [56].

Les principaux points liés aux outils ci-dessus, et présentant un intérêt pour le présent concept énergétique, sont rapidement indiqués ci-dessous.

Plan Directeur des Energies pour la Commune d'Yverdon-les-Bains (nouveau par rapport à 2018)

La Commune d'Yverdon-les-Bains a élaboré un Plan Directeur des Energies, qui sera intégré dans le PDCom sous forme de « volet énergie ». Une carte interactive permet déjà d'obtenir des informations sur les énergies renouvelables préconisée en fonction des quartiers de la ville [57]. La Figure 5 indique les énergies préconisées pour le PQ Verdan. Le PQ verdan se trouve essentiellement en zone vert clair, à savoir en zone avec pompes à chaleur (PAC) sur air et pompes à chaleur sur sondes géothermiques (PAC SGV). Ces technologies et énergies correspondent à celles qui avaient été priorisées dans la version de 2018 du CET pour le PQ de Verdan [58].

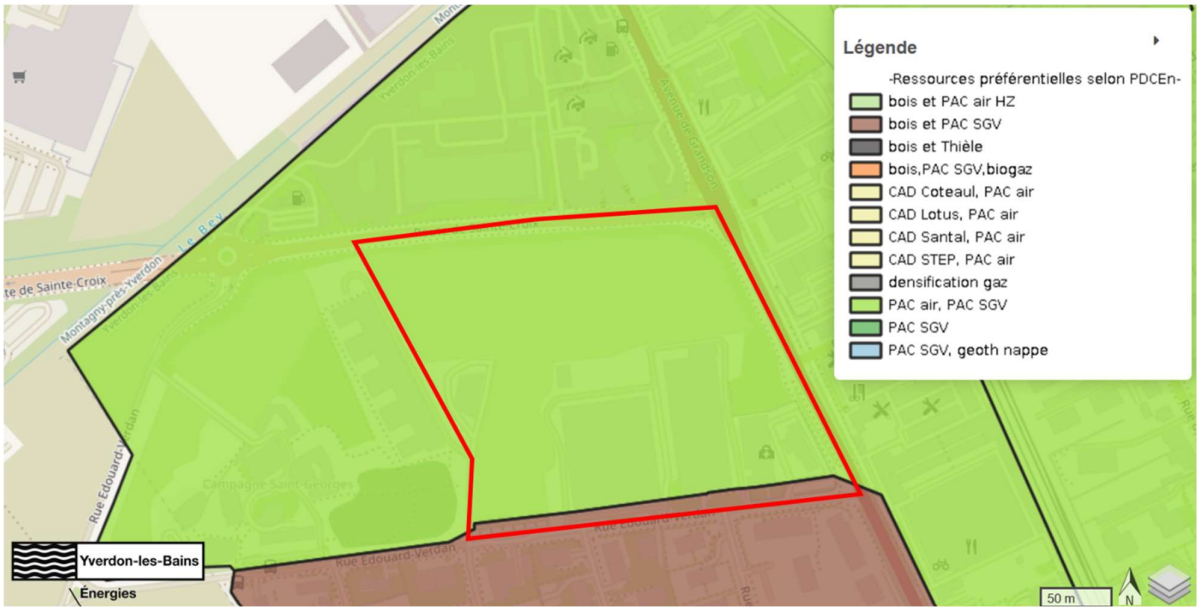


Figure 5 : Extrait du Plan directeur des énergies pour le PQ Verdan [57]

Plan climat 1ère génération (nouveau par rapport à 2018)

Le Plan Climat 1ère génération [55] précise les objectifs que la Commune d'Yveron-les-Bains s'est fixés, en matière de réduction des gaz à effet de serre, en plus des réductions qui découlent des lois cantonales et fédérales. Les principaux objectifs, qui ont une importance dans le cadre du présent CET, sont les suivants :

- Réduction des émissions de CO_2 directes de 60% par rapport à 2019, à l'horizon 2030.
- Réduction des émissions de CO_2 indirectes de 27% par rapport à 2019, à l'horizon 2030.
- Zéro émission nette d'ici à 2050 sur le territoire communale, et d'ici 2040 au sein de l'administration yverdonnoise.
- Electricité, chaleur et froid 100% renouvelable sur tout le territoire communal d'ici 2050 dont 40% à base d'énergies renouvelables locales (p. 73 [55]).

Règlement sur la perception des indemnités communales liées à la distribution d'électricité

Les articles 3 et 4 du règlement stipulent qu'une taxe de 0,40 cts/kWh d'électricité vendue par les services énergétiques de la Ville d'Yverdon-les-Bains, est perçue auprès du consommateur final. Le produit de cette taxe est entièrement reversé au *Fonds communal pour l'efficacité énergétique et les énergies renouvelables*.

Les articles 5 et 6 stipulent qu'une taxe de 0,20 cts/kWh d'électricité vendue par les services énergétiques de la Villes d'Yverdon-les-Bains, est perçue auprès du consommateur final. Le produit de cette taxe est entièrement reversé au *Fonds communal pour le développement durable*.

Agenda 2030 (mis à jour par rapport à 2018)

L'Agenda 2030, qui fait suite à l'Agenda 21 qui avait été développé en 2001, est un outil participatif dont s'est dotée la Commune d'Yverdon-les-Bains, afin de redéfinir la contribution d'Yverdon-les-Bains pour répondre aux 17 objectifs de développement durable de l'ONU, à atteindre d'ici 2030. L'Agenda 2030 a remplacé l'Agenda 21 en 2020 [55].

3 Etat des lieux

Le but de l'état des lieux est de préciser le contexte dans lequel se situe le quartier, afin de déterminer si des éléments particuliers, tels que la qualité de l'air (section 3.1), les infrastructures existantes (section 3.2), ou la proximité d'autres projets d'aménagement du territoire (section 3.3), sont susceptibles d'influencer les scénarios d'approvisionnement énergétique.

3.1 Qualité de l'air (nouveau)

La qualité de l'air est importante pour les chaudières à bois. En effet, si l'air est déjà trop pollué (quelles qu'en soient les raisons), le Canton peut restreindre l'installation de chaudières à bois. Le canton de Vaud distingue 2 catégories de zones [61] :

1. Zones à immission excessives
2. Zones se situant à l'extérieur d'une zone à immissions excessives

Comme on peut le voir dans la Figure 6 ci-dessous, le site de Verdan (en jaune) se situe à l'intérieur d'une zone à immissions excessives (zone orange) [61]. Ceci signifie, notamment, que le recours au bois pour répondre aux exigences de l'article 28a de la Loi sur l'énergie (couvrir au moins 30% de l'énergie pour la production d'eau chaude sanitaire) n'est pas autorisé pour les grands bâtiments nécessitant une chaudière de plus de 70 kW. Dans ces zones, une source d'énergie renouvelable complémentaire, autre que le bois, est nécessaire pour couvrir au moins 30 % de l'énergie pour la production d'eau chaude sanitaire des nouvelles constructions [62]. Ainsi la mise en place de panneaux solaires par exemple reste obligatoire. Sur ce dernier point il faut cependant préciser que la Ville d'Yverdon-les-Bains a reçu une lettre de dérogation, de la part du Canton, par rapport aux différents CAD de la ville alimentés au bois. Cette lettre précise que la pose de panneaux solaires thermiques n'est pas obligatoire en cas de chauffage à distance (CAD) alimenté au bois [12]. Or on peut admettre qu'une telle dérogation serait également possible pour Verdan.

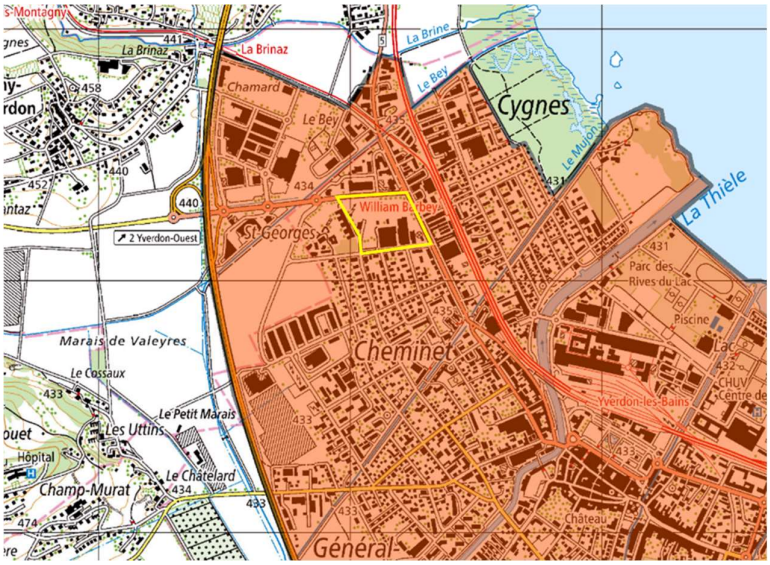


Figure 6 : Extrait de la carte des zones à immissions (en orange) de la Ville d'Yverdon-les-Bains [61], avec le site de Verdan en jaune

3.2 Infrastructures existantes

3.2.1 Réseau d'eaux usées (nouveau)

Le réseau des eaux usées est indiqué dans la figure ci-dessous. Non seulement il n'y a pas de collecteur suffisamment grand pour permettre une valorisation de la chaleur contenue dans les eaux usées, mais en plus la Commune d'Yverdon n'autorise pas la récupération de chaleur en amont de la STEP [63], car un projet de valorisation de la chaleur en sortie de STEP est en cours de déploiement (cf. section 3.2.3) [64].



Figure 7 : Réseau d'eaux claires (en bleu) et d'eaux usées (en rouge) à proximité du quartier [63]

3.2.2 Réseau de gaz

Le réseau de gaz dessert déjà le quartier, comme on peut le voir sur la figure ci-dessous (aucun changement depuis 2017 [65]) :

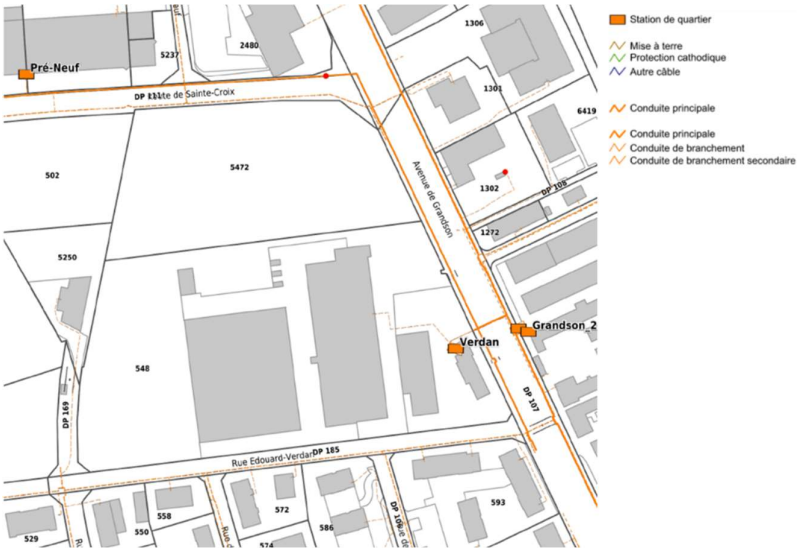


Figure 8 : Réseau de gaz (en orange) à proximité du quartier [12]

3.2.3 Réseaux thermiques

La Ville d'Yverdon-les-Bains mène des études de faisabilité pour plusieurs CAD sur son territoire, à des stades d'avancement très divers, cf. Figure 9 ci-dessous [57]. Dans un premier temps, il n'était prévu de prolongation pour aucun de ces réseaux, et donc le quartier de Verdan ne devait pas pouvoir être connecté. En effet, selon les services industriels de la ville, d'une part ils sont trop éloignés et la mise en place des conduites nécessaires ne serait pas rentable, d'autre part, en ce qui concerne plus spécifiquement le CAD de la STEP, le plus proche du périmètre de Verdan, la puissance de ce CAD ne serait pas suffisante [12]. Ceci étant, à l'heure de terminer la rédaction du présent rapport, il semblerait qu'une éventuelle connexion pourrait malgré tout être étudiée (sans qu'on sache pour l'instant, si cette option pourra être retenue in fine). Le CAD ne peut donc ni être confirmé, ni être infirmé, pour le moment [68].

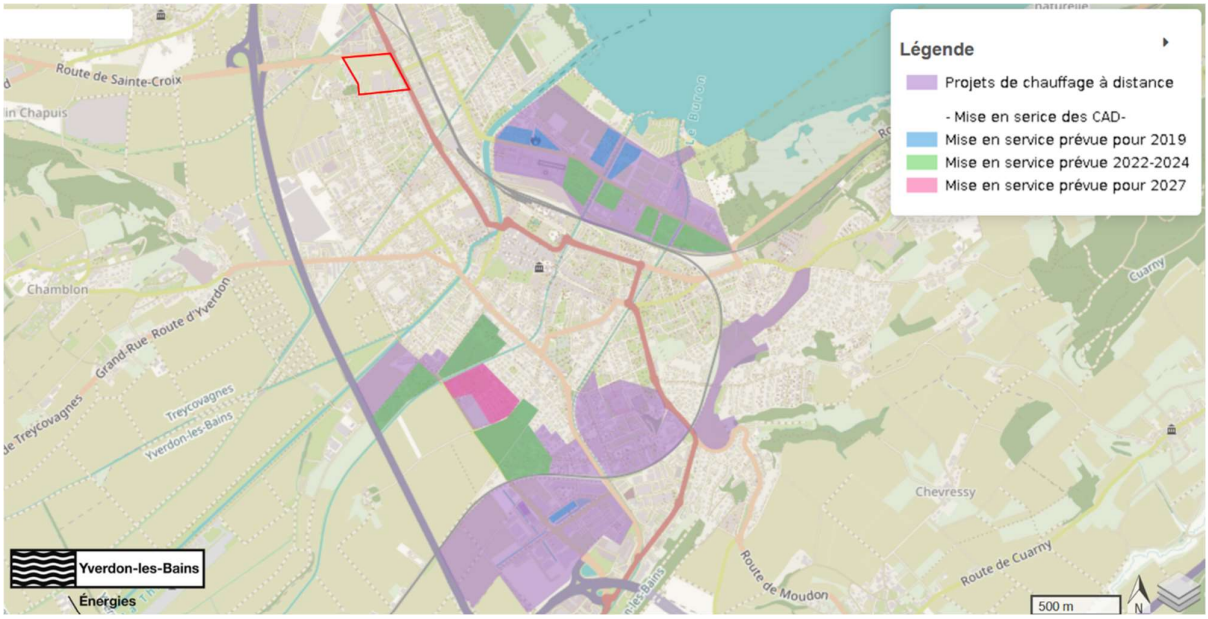


Figure 9 : Stades d'avancement des différents CAD [57] avec le périmètre de Verdan en rouge

3.3 Autres projets d'aménagement du territoire

Le seul projet d'aménagement situé à proximité du quartier de Verdan est le projet de Chamard-Châtelard, à cheval sur les communes de Montagny-près-Yverdon, Yverdon-les-Bains, Grandson et Valeyres-sous-Montagny [24]. Ce projet, qui se trouve à l'ouest et au nord du quartier de Verdan (Figure 10), doit voir la construction de logements et de commerces. A l'heure actuelle cependant, le il n'y a pas de CET concernant ce projet [67]. On ne peut donc pas tenir compte de potentielles synergies entre Chamard-Châtelard et Verdan pour l'instant.

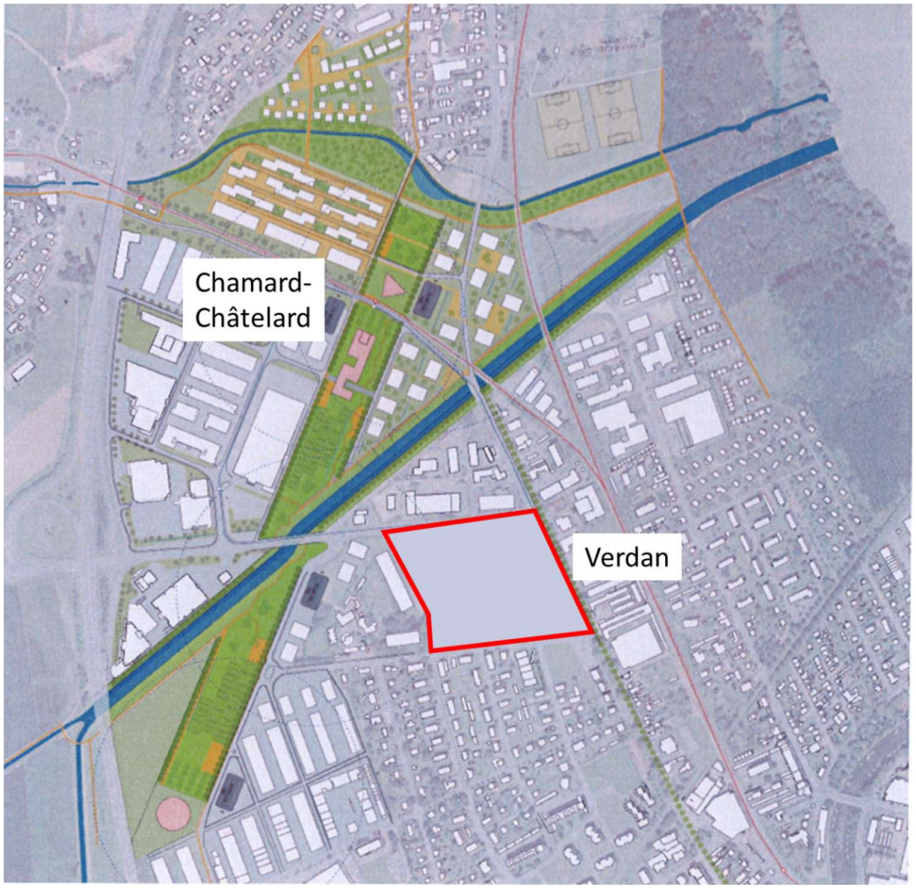
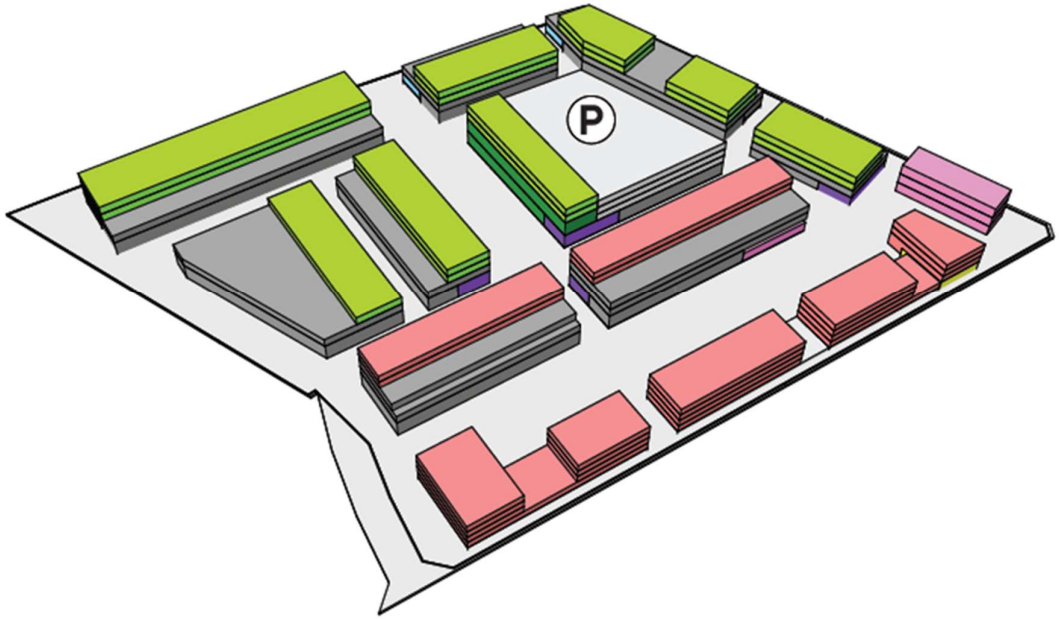


Figure 10 : Zone couverte par le projet Chamard-Châtelard (en couleur) [24] et périmètre du quartier de Verdan

4 Analyse des futurs besoins énergétiques

Cette section est consacrée à l'analyse des besoins énergétiques des futures constructions, à savoir la chaleur pour le chauffage et l'ECS (sans la chaleur de process), le froid (sans le froid de process) et l'électricité (sans l'électricité de process). Le quartier, dans sa configuration prévue, est représenté dans la Figure 7 ci-dessous.



Surface de plancher déterminante par affectation		
AFFECTATION	Superficie	Total
1_ARTISANAT 3m	20759	> 23 300 m²
1_ARTISANAT 4m	2050	**36 269 m²**
1_ARTISANAT 6m	13160	< 41 150 m²
2_BUREAUX	16693	**18 931 m²**
3_ACTIVITES SPORTIVES	2238	< 20 000 m²
4_COMMERCES SPECIALISES	2500	max.
5_COMMERCES DE PROXIMITE	600	max.
6_SERVICES	1200	max.
7_ACTIVITES SOCIALES	2150	max.
8_LOGEMENTS	16150	max.
	77500 m²	

Figure 11 : Extrait de la planche du PQ Verdan, état au 15 novembre 2024 [5]

Précisons que, dans le cadre de ce CET, il n'est pas tenu compte des bâtiments existants, étant donné qu'ils sont voués à être démolis.

L'analyse des futurs besoins se fait sur la base des SBP indiquées par le bureau CCHE [66]. A ce stade de l'étude, on fera l'hypothèse que la surface de référence énergétique (SRE) peut être assimilée à la SBP. De plus, les remarques suivantes doivent être faites :

1. Comme mentionné en introduction, ~80% de la SRE est dédiée à des activités (artisanat, commerces, bureaux et loisirs). La grande majorité des activités est de l'artisanat, sans qu'on sache à ce stade le type précis d'artisanat (artisanat de type menuiserie p.ex., industrie légère, laboratoires). L'entier de l'artisanat est par conséquent assimilé à la catégorie IX selon la SIA 380/1 [30].
2. Le quartier ne sera pas construit en une étape, mais en plusieurs phases. Ceci dit, le phasage précis n'est pas connu à l'heure de rédiger le présent rapport.

Les SRE retenues sont indiquées dans le tableau de la page suivante :

	Catégorie SIA	SRE totale par bâtiment [m^2]	SRE par affectation et bâtiment												
			A1 [m^2]	A2 [m^2]	A3 [m^2]	A4 [m^2]	B1 [m^2]	B1' [m^2]	B2 [m^2]	B3	B4	C1	C2	C3	D
Logements	I	16 150	0	0	0	0	0	0	0	1 934	2 416	4 500	3 400	3 900	0
Bureaux	III	17 893	4 690	2 131	2 658	2 208	1 189	2 490	2 186	0	341	0	0	0	0
Utilité publique / loisir	IV	2 150	0	0	0	0	0	0	0	0	700	0	0	0	1 450
Petits commerces	V	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Commerces	V	3 100	710	793	997	0	0	300	0	0	0	0	0	300	0
Artisanat / industries	IX	35 969	6 000	2 476	3 845	1 992	5 976	2 945	2 476	4 926	5 333	0	0	0	0
Installations sportives	XI	2 238	0	0	0	0	0	0	2 238	0	0	0	0	0	0
TOTAL		**77 500**	**11 400**	**5 400**	**7 500**	**4 200**	**7 165**	**5 735**	**6 900**	**6 860**	**8 790**	**4 500**	**3 400**	**4 200**	**1 450**

Tableau 1 : Répartition des SRE prises en compte, par bâtiment et affectation [5]

La figure ci-dessous montre la répartition de la SRE totale par affectation, et la large part qui sera destinée à l'artisanat :

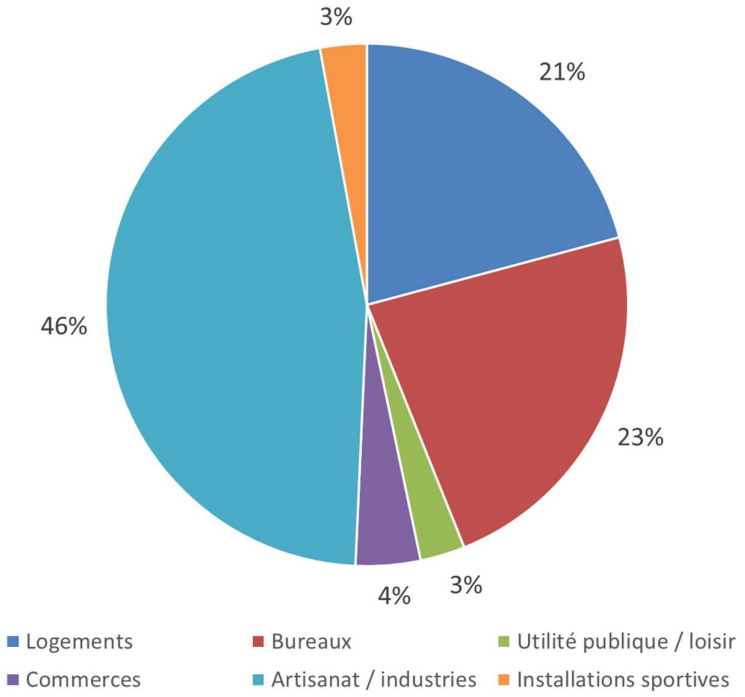


Figure 12 : Répartition des SRE par affectations [5]

Le calcul des besoins énergétiques futurs se fait sur la base des hypothèses ci-dessous, en fonction de trois types de construction définis dans le cadre de cette étude :

1. Construction standard

Chauffage : L'enveloppe du bâtiment, et donc les besoins de chauffage, sont conformes à la norme SIA 380/1 de 2009 [30], et incluent la correction pour la température moyenne annuelle.

ECS : Selon la norme SIA 380/1 de 2009 [30].

Electricité : Selon la norme SIA 380/1 de 2009 [30], tableau 10, pour les techniques du bâtiment (éclairage et installations techniques du bâtiment) ; selon la norme SIA 2031 [32], tableau C1, pour les équipements (machines de bureau, média électroniques, cuisson, lessive,…).

Rafraîchissement : Estimé à l'aide du CT 2024 de la SIA [28] et de la norme SIA 380/4 [31] pour les commerces et les bureaux, pas de rafraîchissement pour les autres affectations.

2. Construction HPE (Haute performance énergétique)

Chauffage : L'enveloppe du bâtiment, et donc les besoins de chauffage, correspondent à 80% des besoins estimés selon la norme SIA 380/1 de 2009 [30], et incluent la correction pour la température moyenne annuelle.

ECS : Selon la norme SIA 380/1 de 2009 [30].

Electricité : Selon la norme SIA 380/1 de 2009 [30], tableau 10, pour les techniques du bâtiment (éclairage et installations techniques du bâtiment) ; selon la norme SIA 2031 [32], tableau C1, pour les équipements (machines de bureau, média électroniques, cuisson, lessive,…).

Rafraîchissement : Estimé à l'aide du CT 2024 de la SIA [28] et de la norme SIA 380/4 [31] pour les commerces et les bureaux, pas de rafraîchissement pour les autres affectations.

3. Construction THPE (Très haute performance énergétique)

Chauffage : L'enveloppe du bâtiment, et donc les besoins de chauffage, correspondent à 70% des besoins estimés selon le MoPec de 2014 [25], et incluent la correction pour la température moyenne annuelle.

ECS : Selon la norme SIA 380/1 de 2009 [30].

Electricité : Selon la norme SIA 380/1 de 2009 [30], tableau 10, pour les techniques du bâtiment (éclairage et installations techniques du bâtiment) ; selon la norme SIA 2031 [32], tableau C1, pour les équipements (machines de bureau, média électroniques, cuisson, lessive,…).

Rafraîchissement : Estimé à l'aide du CT 2024 de la SIA [28] et de la norme SIA 380/4 [31] pour les commerces et les bureaux, pas de rafraîchissement pour les autres affectations.

En termes de puissances, les besoins n'étant pas normés au même titre que les besoins d'énergie, ces derniers sont estimés sur la base de la littérature (notamment [26], [27] et [28] pour le chaud et [28] pour le froid).

Les remarques suivantes doivent être faites par rapport aux hypothèses ci-dessus :

1. Normes de référence :
   Quand bien même la date de réalisation de la présente étude est postérieure à la dernière édition de la norme SIA 380/1 qui date de 2016, la norme de référence considérée pour cette étude est celle de 2009, comme demandé par le Règlement d'application de la LVLEn et confirmé par la DIREN [11].

2. Chauffage pour les constructions de type HPE et THPE:
   En théorie, des bâtiments construits selon le standard Minergie® peuvent consommer jusqu'à 90% des besoins calculés selon la norme SIA 380/1 de 2009. Ceci n'est cependant valable que s'ils sont entièrement chauffés à l'aide d'énergies renouvelables, et non de gaz naturel. Or, étant donné qu'à ce stade de l'étude on ne connaît pas encore l'agent énergétique exact, et que, selon la LVLEne, la part maximale de chauffage qui peut être satisfaite avec du gaz naturel correspond à 80% des besoins de chauffage calculés selon la norme SIA 380/1 de 2009 (Article 30b, alinéa 1), on choisit ici l'hypothèse que, pour des constructions de type HPE, les besoins de chauffage correspondent à 80% des besoins estimés selon la norme SIA 380/1 de 2009. Ceci permettra, par la suite (section 6), de considérer un scénario dit « de base » et comprenant des chaudières à gaz, scénario qui servira de base pour comparer les émissions de CO_2 et la part des énergies renouvelables des scénarios plus « renouvelables ».

3. Besoins d'électricité :
   On constate qu'avec les hypothèses faites ci-dessus, les besoins d'électricité liés à l'éclairage et aux installations techniques des bâtiments sont les mêmes, quel que soit le type de construction. Ceci est lié au fait que, selon la LVLEne, les constructions nouvelles doivent être équipées de sorte que ces besoins d'électricité, calculés selon le tableau 10 de la norme SIA 380/1 de 2009 et sans faire de distinction par rapport au type de construction [11], soient couverts pour au moins 20% par une source renouvelable. En revanche, les besoins d'électricité liés aux équipements ne sont pas concernés par cette loi, raison pour laquelle ces besoins peuvent être différenciés en fonction du type de construction. Ainsi, on fait l'hypothèse ici que les constructions de type THPE seront équipées par des équipements

offrant des rendements supérieurs à ceux installés dans des constructions de type standard ou HPE.

4. Besoins de rafraîchissement :
   Les besoins de rafraîchissement ne sont pas normés au même titre que les besoins de chauffage ou d'ECS. De plus, il n'existe pas de statistiques suffisamment bien documentées concernant l'évolution des besoins de rafraîchissement en fonction du type de construction. Les quelques retours sur expérience concernant des bâtiments administratifs semblent cependant indiquer que, plus l'enveloppe du bâtiment est isolante (et donc plus les besoins de chauffage sont bas), plus il est difficile d'extraire la chaleur excédentaire en été. Ceci est surtout vrai pour des bâtiments de bureaux par exemple, comprenant des nombreux équipements informatiques. Dans le présent rapport on a fait l'hypothèse, par conséquent, que les besoins de rafraîchissement ne diminuent pas avec l'augmentation de l'isolation du bâtiment. Ainsi, ces besoins sont les mêmes pour des bâtiments de type standard, HPE ou THPE.

Les consommations et puissance estimées sont données dans les tableaux ci-dessous :

Bâtiment	Chauffage			ECS	Puissance chaud		
	SIA [MWh/an]	HPE [MWh/an]	THPE [MWh/an]	[MWh/an]	SIA [kW]	HPE [kW]	THPE [kW]
A1	486	389	308	79	314	252	199
A2	223	178	141	38	156	125	99
A3	316	252	200	52	216	173	137
A4	177	142	112	29	111	89	70
B1	339	271	217	50	195	156	124
B1'	244	195	155	40	157	126	99
B2	345	276	221	219	187	149	119
B3	316	253	202	75	196	157	125
B4	395	316	253	95	250	200	160
C1	167	134	105	94	140	112	88
C2	126	101	80	71	105	84	66
C3	154	123	97	83	134	107	84
D	60	48	39	10	41	33	27
TOTAL	**3 348**	**2 678**	**2 129**	**933**	**2 201**	**1 761**	**1 397**

Tableau 2 : Besoins en énergie et puissance pour le chaud (inclus l'ECS)

Bâtiment	Energie froid SIA/HPE/THPE [MWh/an]	Puissance froid SIA/HPE/THPE [kW]	Electricité - techniques du bâtiment [MWh/an]	Electricité - équipements		
				SIA [MWh/an]	HPE [MWh/an]	THPE [MWh/an]
A1	142	190	228	240	240	192
A2	81	101	115	105	105	84
A3	101	126	156	153	153	122
A4	55	79	82	86	86	69
B1	30	42	126	189	189	152
B1'	73	98	114	120	120	96
B2	55	78	102	103	103	82
B3	0	0	136	182	182	146
B4	9	12	171	213	213	170
C1	0	0	125	90	90	72
C2	0	0	94	68	68	54
C3	10	9	118	80	80	64
D	0	0	16	9	9	7
TOTAL	**555**	**735**	**1 585**	**1 637**	**1 637**	**1 310**

Tableau 3 : Besoins en énergie et puissance pour le froid, besoins en énergie pour l'électricité

Les besoins de chaleur pour le chauffage sont illustrés dans le graphique ci-dessous (les besoins de froid et d'électricité ne variant pas, ou que très peu, d'un type de construction à l'autre, on n'a pas considéré intéressant de les représenter graphiquement) :

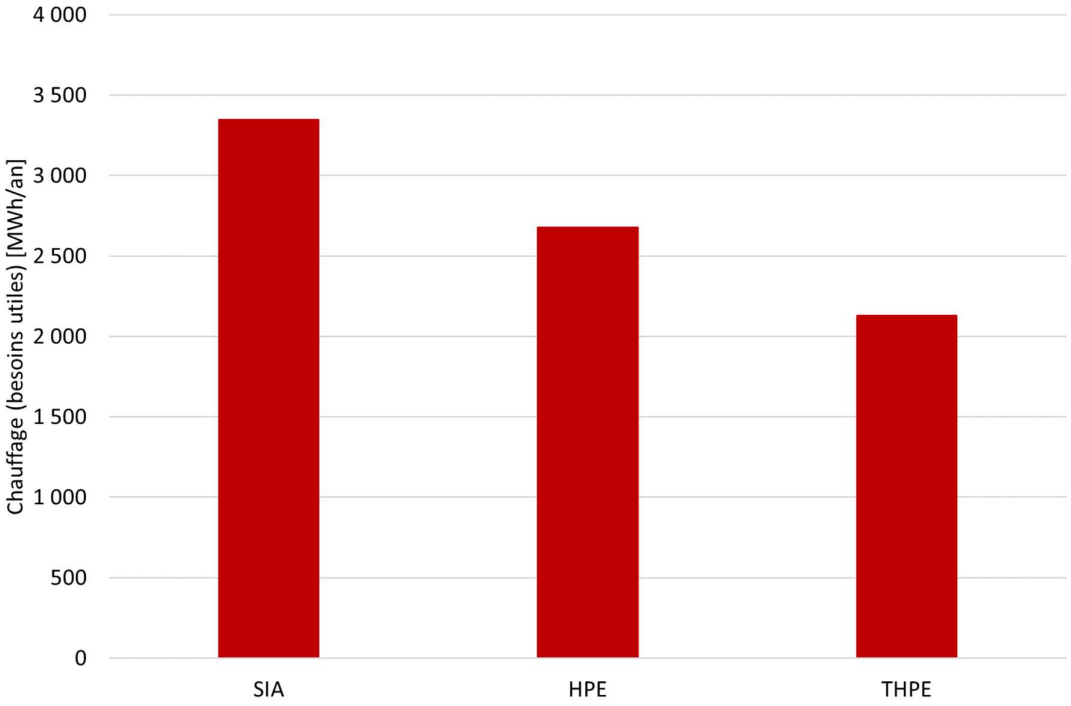


Figure 13 : Besoins de chaleur pour le chauffage

On retrouve bien dans le graphique ci-dessus des besoins qui diminuent de 80% entre des constructions de type SIA et HPE, conformément aux hypothèses de calcul, et des besoins qui diminuent de 63% entre des constructions de type SIA et THPE.

5 Analyse des ressources énergétiques disponibles

Dans cette section on synthétise les ressources énergétiques locales disponibles, aussi bien en termes d'énergie qu'en termes de puissance, et leur capacité à satisfaire les besoins du quartier.

5.1 Energie solaire

L'énergie solaire peut être valorisée de deux manières différentes : pour générer de la chaleur (panneaux solaires thermiques), ou pour générer de l'électricité (panneaux photovoltaïques).[3] Pour estimer le potentiel solaire, on considère la surface totale de toiture [5], et on calcule des potentiels à partir de là (en négligeant le potentiel offert par les façades pour la pose de panneaux verticaux). Les hypothèses suivantes ont été faites :

1. L'ensoleillement annuel au niveau d'Yverdon est de 1'100 kWh/m^2/an.
2. La surface disponible pour mettre des panneaux (photovoltaïques ou thermiques) correspond à 90% de la surface de la toiture.
3. En tenant compte de l'inclinaison des panneaux, la surface résultante, des panneaux, correspond à 45% de la surface de toiture obtenue au point 2 ci-dessus.
4. Pour les panneaux photovoltaïques, le rendement est de 17% [19] et le rendement de l'onduleur de 90%. Pour les panneaux solaires thermiques, le rendement du système, pour un taux de couverture de l'ECS de 30%, est de 40% (incluant le rendement des panneaux, le rendement des conduites de raccordement au ballon d'ECS, et le rendement du ballon d'ECS lui-même)[4] [20].

Les surfaces de toiture disponibles retenues sont indiquées en jaune dans la figure ci-dessous. Au stade du CET, on s'est limité à exclure de l'analyse les toitures dont on peut supposer qu'elles seront majoritairement à l'ombre, ainsi que les toitures utilisées pour des terrasses. Le potentiel exact en fonction des heures d'ensoleillements sur chacune des toitures pourra être déterminé lors des études détaillées.

[3] En réalité il existe encore les panneaux hybrides, mais ils ne sont volontairement pas pris en compte ici. En effet ils ne permettent pas de satisfaire des besoins d'ECS sans recours à une autre énergie (les panneaux hybrides ne permettent que de faire le pré-chauffage). En revanche, il convient de préciser qu'ils ont des très bons rendements électriques, et qu'ils pourraient éventuellement être considérés dans les phases plus avancées du projet (lors de la modélisation des bâtiments).

[4] Le rendement dépend grandement du taux de couverture d'ECS par les panneaux solaires. On a choisi ici un taux de couverture de 30%, qui correspond au minimum légal requis. En augmentant le taux de couverture, le rendement global augmente. Pour des raisons techniques, on ne pourra cependant pas dépasser un taux de couverture de 60% environ.

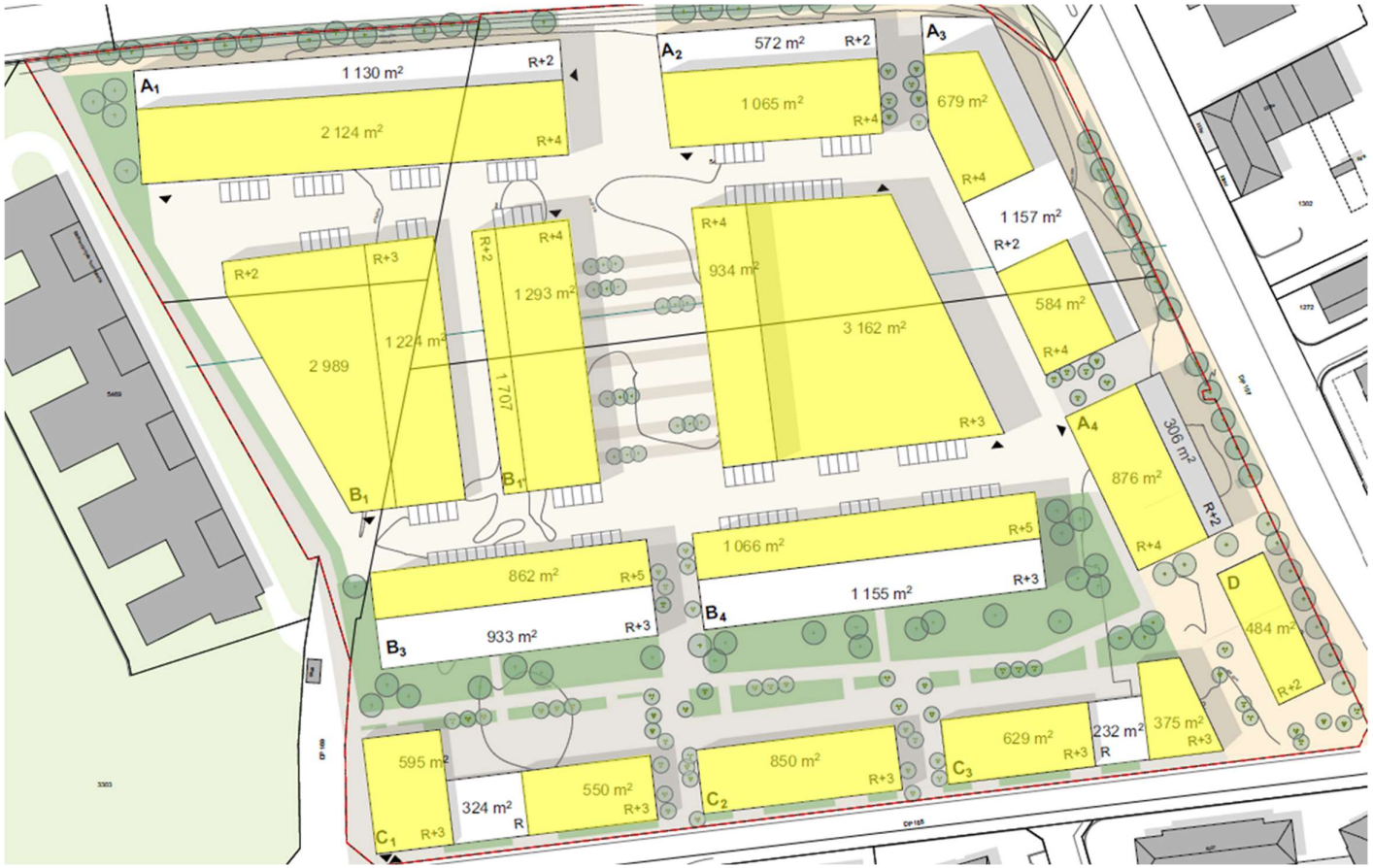


Figure 14 : Surfaces de toitures retenues dans le cadre de l'analyse du potentiel solaire (en jaune)

Les potentiels électriques et thermique, ainsi que les surfaces de toiture requises pour satisfaire aux exigences légales, sont indiqués dans le tableau ci-dessous :

Bâtiment	Surface toiture disponible	Potentiel électrique	Potentiel thermique	Surface de toiture requise pour les techniques du bâtiment	Surface de toiture requise pour les groupes froid	Surface de toiture requise pour l'ECS	Surface toiture totale requise
	[m^2]	[MWh/an]	[MWh/an]	[m^2]	[m^2]	[m^2]	[m^2]
A1	2 124	153	378	633	197	444	1 275
A2	1 065	77	190	320	112	210	643
A3	1 263	91	225	435	140	292	867
A4	876	63	156	229	77	164	469
B1	4 213	303	751	350	41	279	671
B1'	3 000	216	535	318	101	223	643
B2	4 096	295	730	284	76	1 228	1 589
B3	862	62	154	378	0	418	796
B4	1 066	77	190	476	12	531	1 019
C1	1 145	82	204	347	0	526	874
C2	850	61	151	263	0	397	660
C3	1 004	72	179	329	14	468	811
D	484	35	86	45	0	57	101
TOTAL	**22 048**	**1 586**	**3 929**	**4 407**	**771**	**5 238**	**10 417**

Tableau 4 : Surfaces de toiture disponibles, potentiels électriques et thermiques, et surfaces de toiture requises pour satisfaire aux exigences légales

Les potentiels électriques et thermiques totaux indiqués dans le tableau ci-dessus (colonnes 3 et 4) doivent être compris de façon exclusive. C'est-à-dire que le potentiel électrique global de 1'586 MWh/an ne peut être obtenu que si l'entier des toitures est recouvert de panneaux photovoltaïques (sans laisser de place au panneaux solaires thermiques), et le potentiel thermique global de 3'929 MWh/an ne peut être obtenu que si l'entier de la toiture est recouvert de panneaux thermiques (sans laisser de place au panneaux solaires photovoltaïques). Dans un deuxième temps, il convient de vérifier si les toitures à disposition sont suffisamment grandes pour satisfaire aux exigences légales (aussi bien en matière d'électricité que de chaleur). C'est ce qui est fait dans la dernière colonne. Comme on peut le constater, les surfaces requises sont toutes largement plus petites que les surfaces disponibles (colonne 2). On peut donc affirmer que les exigences légales pourront être satisfaites. Précisons enfin qu'on a considéré ici que les besoins de froid étaient forcément satisfaits par des groupes froid, or comme on le verra dans les scénarios d'approvisionnement, dans un cas en particulier on peut faire du geo-cooling, et ainsi s'affranchir de panneaux photovoltaïques pour satisfaire 50% des besoins d'électricité liés aux groupes froid.

Conclusion

Le potentiel solaire est intéressant pour le présent quartier.

5.2 Géothermie

La géothermie comprend essentiellement quatre options [6] :

1. Géothermie de très faible profondeur (jusqu'à 30m) : valorisation du sous-sol (corbeilles géothermiques, géostructures ou sondes horizontales) par pompe à chaleur (PAC) sol-eau, voire eau-eau en cas de présence de nappes souterraines.
2. Géothermie de faible profondeur (jusqu'à 400m environ) : valorisation du sous-sol (sondes verticales) par PAC sol-eau ou eau-eau (en cas de présence de nappes souterraines).
3. Géothermie de moyenne profondeur (jusqu'à 3'000m environ) : valorisation directe ou indirecte de températures de l'ordre de 30 à 70°C.
4. Géothermie de grande profondeur (plus de 3'000m) : valorisation directe de températures de l'ordre de 100 à 150°C, production d'électricité possible.

Ces différents modes de valorisation de la géothermie sont illustrés dans la figure ci-après :

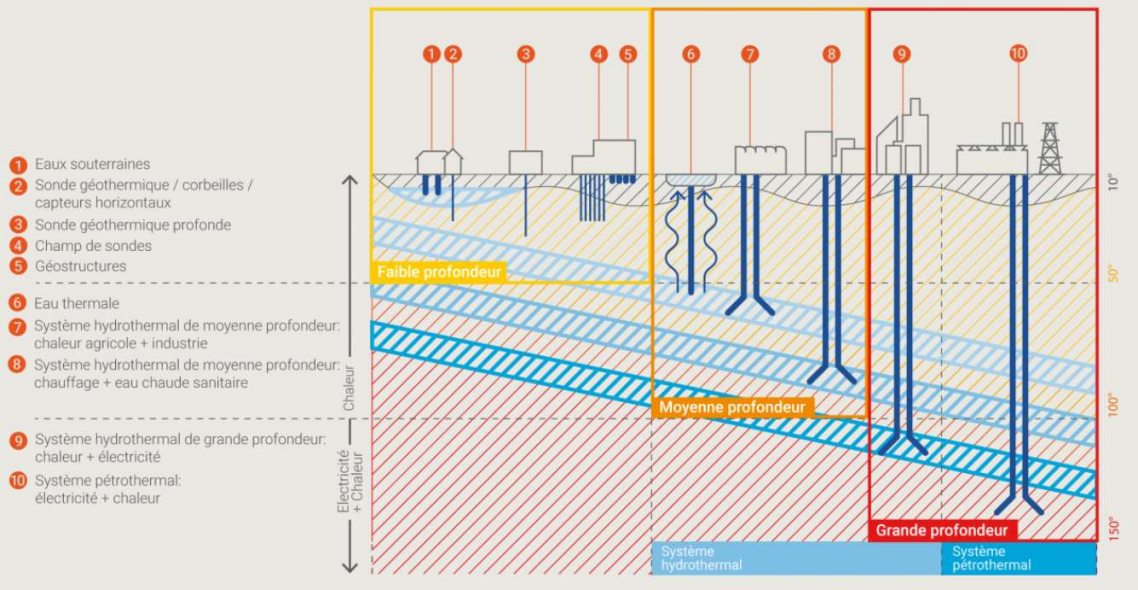


Figure 15 : Modes de valorisation de la géothermie [6]

Dans la suite de ce rapport, on s'intéressera à la géothermie de faible et moyenne profondeur (points 2 et 3 ci-dessus). La géothermie de très faible profondeur ne présente en effet pas grand intérêt pour un quartier demandant des puissances de chauffage telles que celles du présent quartier. Quant à la géothermie de haute profondeur, elle est en principe analysée à l'échelle de la commune, voire du canton. Précisons qu'à part pour la valorisation de la géothermie grâce à des sondes, qui est analysée plus en détails ci-dessous, la majorité des informations et conclusions ci-dessous sont reprises du rapport d'Alpgeo [48].

Géothermie de faible profondeur

La géothermie de faible profondeur comprend deux catégories : les nappes phréatiques (valorisation grâce à un doublet) et la géothermie en terrain sec (valorisation grâce à des sondes). Verdan se situe sur des nappes phréatiques. Ainsi, si la mise en place de sondes reste possible (zone üB), la présence d'une nappe pourrait s'avérer nettement plus efficace énergétiquement et plus rentable que des sondes, surtout si l'écoulement d'eau est important.

En ce qui concerne les nappes, deux nappes doivent être considérées [48]: une première nappe se situant directement à l'emplacement du quartier, à moins de 10 m de profondeur, et une deuxième nappe se situant à environ 500 m à l'ouest du quartier, à plus de 12 m de profondeur. La capacité de la nappe se situant directement à l'emplacement du quartier de Verdan, à faible profondeur, est malheureusement largement inférieure aux besoins du quartier (à peine 10% à 15% des besoins en chaleur par exemple), et ne présente donc aucun intérêt. Quant à la deuxième nappe, sa capacité serait, en première approximation, juste suffisante pour le quartier de Verdan, mais présente les inconvénients suivants :

1. sa distance par rapport au quartier de Verdan (> 500 m),
2. son emplacement (elle se situe en réalité sur la Commune de Montagny).

En ce qui concerne les sondes, cette option est analysée pour deux cas de figure différents :

1. le cas d'un système mononvalent (c'est-à-dire sans appoint gaz pour couvrir les pointes de consommations),

2. le cas d'un système bi-valent (c'est-à-dire avec appoint gaz pour couvrir les pointes, le système PAC-sondes étant dimensionné dans ce cas à 50% de la puissance totale requise).

Les hypothèses suivantes servent de base pour les calculs :

1. Puissance et énergie d'extraction : 20 W/m et 40 kWh/m/an [13].
2. La longueur d'une sonde est de 300m (basé sur [14]).
3. Pour le système bi-valent, la PAC et dimensionnée pour satisfaire 50% des besoins en puissance, soit environ 80-85% des besoins en énergie.

Le tableau suivant indique le nombre de sondes requises (avec et sans appoint gaz) :

Bâtiment	Puissance PAC [kW]	Chauffage délivré par le système PAC-sondes [MWh/an]	ECS délivré par le système PAC-sondes [MWh/an]	Nombre de sondes [-]
A1	252	389	79	34
A2	125	178	38	17
A3	173	252	52	24
A4	89	142	29	12
B1	156	271	50	21
B1'	126	195	40	17
B2	149	276	219	20
B3	157	253	75	21
B4	200	316	95	27
C1	112	134	94	15
C2	84	101	71	11
C3	107	123	83	14
D	33	48	10	5
TOTAL	**1 761**	**2 678**	**933**	**238**

Tableau 5 : Nombre de sondes requises sans appoint gaz

	Puissance PAC [kW]	Puissance chaudière [kW]	Chauffage délivré par le système PAC-sondes [MWh/an]	ECS délivré par le système PAC-sondes [MWh/an]	Chauffage délivré par la chaudière gaz [MWh/an]	Nombre de sondes [-]
A1	126	126	311	79	78	21
A2	62	62	143	38	36	10
A3	86	86	202	52	50	14
A4	44	44	113	29	28	8
B1	78	78	217	50	54	15
B1'	63	63	156	40	39	11
B2	75	75	221	219	55	15
B3	78	78	202	75	51	14
B4	100	100	253	95	63	17
C1	56	56	107	94	27	8
C2	42	42	81	71	20	6
C3	53	53	99	83	25	7
D	17	17	38	10	10	3
TOTAL	**881**	**881**	**2 143**	**933**	**536**	**149**

Tableau 6 : Nombre de sondes requises avec appoint gaz

Comme on peut le constater, même avec un appoint gaz (Tableau 6), le nombre de sondes requises est important pour l'ensemble du quartier (149 sondes). Avec un nombre de sondes aussi important, une recharge du terrain est indispensable. En effet, si l'on voulait s'affranchir de la recharge il faudrait espacer les sondes de 50m environ, et ainsi on dépasserait le périmètre de Verdan. Une seconde

analyse a donc dû être faite, en intégrant une recharge du terrain avec les rejets thermiques provenant du rafraîchissement estival des bureaux et des commerces, et en agrégeant les besoins de chaleur et de froid sur l'ensemble du quartier. Les hypothèses ci-dessus devraient être remplacées par les hypothèses ci-dessous, pour pouvoir évaluer le nombre de sondes requises et le taux de recharge résultant :

1. Puissance et énergie d'extraction : 40 W/m et 60 kWh/m/an [13].
2. Puissance et énergie d'injection : 12 W/m et 20 kWh/m/an [13].
3. Le nombre de sondes est calculé sur la base des besoins de chaleur (chauffage et ECS) et non des besoins de froid.
4. La longueur d'une sonde est de 300m (basé sur [14]).
5. La PAC est dimensionnée pour satisfaire 50% des besoins en puissance, soit environ 80-85% des besoins en énergie (le reste étant fourni par une chaudière à gaz).

Les résultats sont indiqués dans le tableau ci-dessous, pour le quartier considéré dans sa globalité :

Puissance PAC	[kW]	881
Energie utile PAC	[MWh/an]	2 143
Puissance chaudière gaz	[kW]	881
Energie utile chaudière gaz	[MWh/an]	536
Nombre de sondes	[-]	135
Puissance froid utile faisable avec le nombre de sondes calculé pour le chaud	[kW]	487
Energie froid utile faisable avec le nombre de sondes calculé pour le chaud	[MWh/an]	812
Taux de recharge	[%]	33%

Tableau 7 : Nombre de sondes requises avec recharge du terrain et appoint gaz

On constate que si le nombre de sondes (soit 135) est légèrement réduit par rapport aux 149 sondes du Tableau 6, la puissance de froid résultante est de 487 kW seulement (à comparer avec les 735 kW requis). De plus, le taux de recharge est dans la limite inférieure (un taux de recharge entre 30% et 90% devrait être atteint [13]). Ainsi, on se retrouve dans une situation paradoxale où, d'un côté, les besoins de froid ne garantissent pas une recharge suffisante, alors que, d'un autre côté, le nombre de sondes requises pour le chaud ne permettent pas de satisfaire l'entier des besoins de froid au niveau de la puissance (et donc une partie des rejets liés au froid doivent être évacués ailleurs que dans les sondes). Cet apparent paradoxe n'est pas forcément étonnant au stade du CET, car les résultats dépendent fortement des hypothèses liées aux puissance et énergie de chaud et de froid qu'on peut extraire/injecter dans ou du sol.

L'option des sondes ne peut donc être exclue à ce stade, mais une étude approfondie sur les vitesses d'écoulement de la nappe est absolument nécessaire, pour déterminer si le manque de recharge pourrait devenir problématique ou non. Le cas échéant, il conviendrait de faire un test de réponse thermique pour affiner les hypothèses ci-dessus et analyser si, et comment, le paradoxe mentionné peut être résolu. Rappelons aussi que les calculs du tableau ci-dessus ont été faits pour le quartier dans son ensemble. Si on faisait l'analyse bâtiment par bâtiment, on constaterait que pour certains bâtiments la recharge est trop importante, alors qu'elle est quasi inexistante pour d'autres bâtiments. Ainsi, si l'on veut mettre en place un scénario d'approvisionnement basé sur des sondes, il faudrait bel et bien considérer le quartier dans son ensemble, en mettant les bâtiments et le champ de sondes en réseau (typiquement à l'aide d'une boucle d'anergie).

Géothermie de moyenne profondeur ([49], [65])

Une étude menée initialement par le bureau Alpgeo avait permis de vérifier le potentiel géothermique à moyenne profondeur. La Commune d'Yverdon-les-Bains est en effet située sur une zone géologique accidentée, lui permettant de bénéficier d'un sous-sol intéressant au niveau énergétique. Ainsi, une ressource qui semble avoir un potentiel non négligeable est l'aquifère du Crétacé qui se situe à 750m environ sous le quartier de Verdan. Cet aquifère a des débits entre 6 l/s et 34 l/s à des températures de 25°C à 35°C. Les puissances seraient suffisantes pour couvrir les besoins du Quartier du Verdan. La structure du sous-sol doit cependant être validée par une campagne de prospection (par sismique réflexion) actuellement en cours, et les premiers résultats ne seront disponibles que début 2026 a priori. En cas de résultat probant, il s'en suivra une phase de recherche en sous-sol avec la réalisation de forages de mise en valeur pour confirmer la présence d'eau, les débits disponibles et la température de l'eau (horizon 2028-2029). Enfin, une demande de concession sera demandée au Canton avant de pouvoir exploiter cette ressource géothermale (horizon 2030).

Conclusion

La géothermie de faible profondeur semble présenter un certain potentiel, mais le nombre de sondes représente un défi logistique important. La géothermie de moyenne profondeur un potentiel à première vue important. Pour cette dernière option cependant, des études exploratoires doivent être menées.

5.3 Eaux de source

Le rapport réalisé par le bureau Alpgeo [48] mentionne une source d'eau au Mont de Chamblon, présentant des débits oscillant entre 60 et 840 l/s [49], pour des températures allant de 8,6°C à 13,6°C. Cette source étant cependant protégée, une valorisation thermique n'est pas possible.

Conclusion

L'eau de source ne présente pas de potentiel valorisable.

5.4 Bois

Comme en témoigne le nombre de chauffages à distance (CAD) alimentés par une chaudière à bois en Suisse, le bois constitue indiscutablement une ressource intéressante pour les CAD. En outre, le potentiel du bois dans le canton de Vaud dans sa globalité n'est pas encore totalement exploité : on estime à l'heure actuelle qu'il reste encore 20% du bois-énergie disponible. La Stratégie bois-énergie du canton de Vaud précise que : *« Le Canton soutient les centrales de bois-énergie pour autant que leur localisation s'avère pertinente au regard des autres potentialités énergétiques renouvelables offertes par le territoire et des dynamiques (économiques, paysagères, environnementales, etc.) de ce dernier. »* Parallèlement, la Conception Cantonale de l'énergie préconise de valoriser en premier lieu les gisements énergétiques situationnels qui ne peuvent pas être déplacés et qui doivent être utilisés sur place (géothermie, nappes, eau de lac, etc.) [50]. Enfin, rappelons que le quartier se situe dans une zone à immissions excessives (cf. section 3.1), ce qui ne plaide pas directement en faveur du bois.

En outre, il conviendra de tenir compte des deux points ci-dessous, lors de l'installation d'une chaufferie à bois:

1. La combustion du bois génère occasionnellement des odeurs de « brûlé » lors de la combustion. Ces odeurs peuvent présenter des désagréments pour la population. Il convient donc de choisir de façon adéquate l'emplacement de la chaufferie, en tenant compte notamment des vents dominants.

2. La combustion du bois émet notamment des poussières fines. Pour lutter contre ces poussières fines, le Canton a émis une directive pour la mise en place de chaudières à bois dans des zones déjà moyennement ou fortement polluées, c'est-à-dire les zones pour lesquelles les concentrations de particules fines sont élevées. Le périmètre du PLQ se situant précisément dans une zone à immissions excessives, elle devra se conformer strictement à la directive du Canton le cas échéant, comme indiqué dans le tableau ci-après.

Exigences		Puissance calorifique **inférieure ou égale à 70 kW**		Puissance calorifique **de 70 kW à 500 kW**		Puissance calorifique **de 500 kW à 1 MW**		Puissance calorifique **de 1 MW à 10 MW**	
		Zones à immissions excessives	Hors zones à immissions excessives	Zones à immissions excessives	Hors zones à immissions excessives	Zones à immissions excessives	Hors zones à immissions excessives	Zones à immissions excessives	Hors zones à immissions excessives
Certificat de qualité (QM)		–	–	Obligatoire	Recommandé	Obligatoire	Recommandé	Obligatoire	Recommandé
Eau chaude sanitaire (LVLEne, art. 28a [1])		Capteurs solaires / CAD ER ou rejets de chaleur	Capteurs solaires / CAD ER ou rejets de chaleur	Capteurs solaires / CAD ER ou rejets de chaleur	Capteurs solaires / CAD ER ou rejets de chaleur / bois	Capteurs solaires / CAD ER ou rejets de chaleur	Capteurs solaires / CAD ER ou rejets de chaleur / bois	Capteurs solaires / CAD ER ou rejets de chaleur	Capteurs solaires / CAD ER ou rejets de chaleur / bois
Contrat d'entretien		–	–	Obligatoire	Recommandé	Obligatoire	Recommandé	Obligatoire	Recommandé
Fréquence des contrôles		Tous les 4 ans	Tous les 4 ans	Tous les 2 ans	Tous les 2 ans	Tous les ans	Tous les 2 ans	Tous les ans	Tous les 2 ans
Valeurs limites d'émissions [2]	Monoxyde de carbone (CO)	Ch. Auto : 1000 mg/m³ Ch. Man : 2500 mg/m³	Ch. Auto : 1000 mg/m³ Ch. Man : 2500 mg/m³	500 mg/m³	500 mg/m³	500 mg/m³	500 mg/m³	250 mg/m³	250 mg/m³
	Particules solides (PM)	Ch. Auto : 50 mg/m³ Ch. Man : 100 mg/m³	Ch. Auto : 50 mg/m³ Ch. Man : 100 mg/m³	≤250kW : 50 mg/m³ >250kW : 20 mg/m³	50 mg/m³	20 mg/m³	20 mg/m³	20 mg/m³	20 mg/m³
	Oxydes d'azote (NO_x)	–	–	250 mg/m³	–	250 mg/m³	–	200 mg/m³	250 mg/m³
Suivi des émissions		–	–	Filtre à particules : disponibilité garantie 90% du temps	Filtre à particules : disponibilité garantie 90% du temps	Filtre à particules : disponibilité garantie 90% du temps	Filtre à particules : disponibilité garantie 90% du temps	Filtre à particules : disponibilité garantie 90% du temps + suivi CO (évent. NO_x)	Filtre à particules : disponibilité garantie 90% du temps (évent. CO et NO_x)

Toute nouvelle installation d'une puissance calorifique supérieure à 70 kW nécessite une autorisation spéciale (art. 120, LATC) délivrée dans le cadre d'une procédure de permis de construire.
Pour les installations d'une puissance calorifique supérieure à 10 MW, les exigences sont définies au cas par cas.

1 LVLEne, art. 28a : Part minimale d'énergie renouvelable pour les besoins en eau chaude sanitaire des bâtiments
Les constructions nouvelles sont équipées de sorte que la production d'eau chaude sanitaire, dans des conditions normales d'utilisation, soit couverte pour au moins 30% par l'une des sources d'énergie suivantes :
a. des capteurs solaires ;
b. un réseau de chauffage à distance (CAD) alimenté majoritairement par des énergies renouvelables (ER) ou des rejets de chaleur ;
c. du bois, à condition que la puissance nominale de la chaudière excède 70 kW, hors des zones soumises à immissions excessives.

2 Légende : Ch. Auto = Chaudières à chargement automatique, Ch. Man = Chaudières à chargement manuel.

Tableau 8 : Récapitulatif des exigences pour les chaudières à bois, en fonction de la puissance [62] (annexe)

Malgré les inconvénients précités, le bois reste une source d'énergie intéressante, car il se démarque en particulier des combustibles classiques par son caractère renouvelable et sa production locale. Il faut également préciser qu'au niveau national, le bois n'est responsable que de 8% des émissions de particules fines, l'immense majorité étant générée par les véhicules motorisés [17].

Ceci étant, le bois étant déjà exploité dans plusieurs CAD de la Ville, et les ressources en bois de la Ville elle-même se faisant rares [12], cette ressource n'est pas prioritaire selon la politique énergétique de la ville, si d'autres ressources renouvelables sont disponibles.

Conclusion

Le bois n'est pas une priorité pour le quartier de Verdan, mais reste une option dans le cas où il n'y aurait pas d'autres ressources renouvelables disponibles.

5.5 Air

L'air est une source énergétique intéressante tant pour le chauffage des locaux, où l'air peut servir de source énergétique à l'évaporateur d'une pompe à chaleur, que pour le froid, où l'air peut être utilisée comme source froide au condenseur d'un groupe froid. L'air étant omniprésent et illimité, cette ressource présente, de plus, l'avantage d'être aisément disponible. Les unités (pompes à chaleur ou groupes froid) utilisant l'air et dépassant quelques dizaines de kW, devront cependant être placées en toiture, pour éviter des circulations d'air trop importantes. De plus à partir de 50-70 kW environ, des caissons d'isolation devront éventuellement être placés autour des unités, afin d'atténuer les nuisances sonores. L'obligation ou non de mettre un caisson d'isolation dépend du bruit occasionné par l'installation, du degré de sensibilité au bruit dans laquelle se trouve le quartier, et de l'Ordonnance pour la protection contre le bruit qui édicte les valeurs limites d'exposition en fonction du degré de sensibilité au bruit de la zone (cf. Tableau 9). Le quartier de Verdan se trouve en zone de degré 3. Il convient en outre de préciser que, même s'il se trouve au voisinage d'une zone de degré 2 (cf. Figure 16), le règlement du plan de quartier prévoit de le maintenir en zone de degré 3.

Degré de sensibilité (art. 43)	Valeur de planification Lr en dB (A)		Valeur limite d'immission Lr en dB (A)		Valeur d'alarme Lr en dB (A)	
	Jour	Nuit	Jour	Nuit	Jour	Nuit
I	50	40	55	45	65	60
II	55	45	60	50	70	65
III	60	50	65	55	70	65
IV	65	55	70	60	75	70

Tableau 9 : Valeurs limites d'exposition en fonction de degré de sensibilité au bruit de la zone [21]

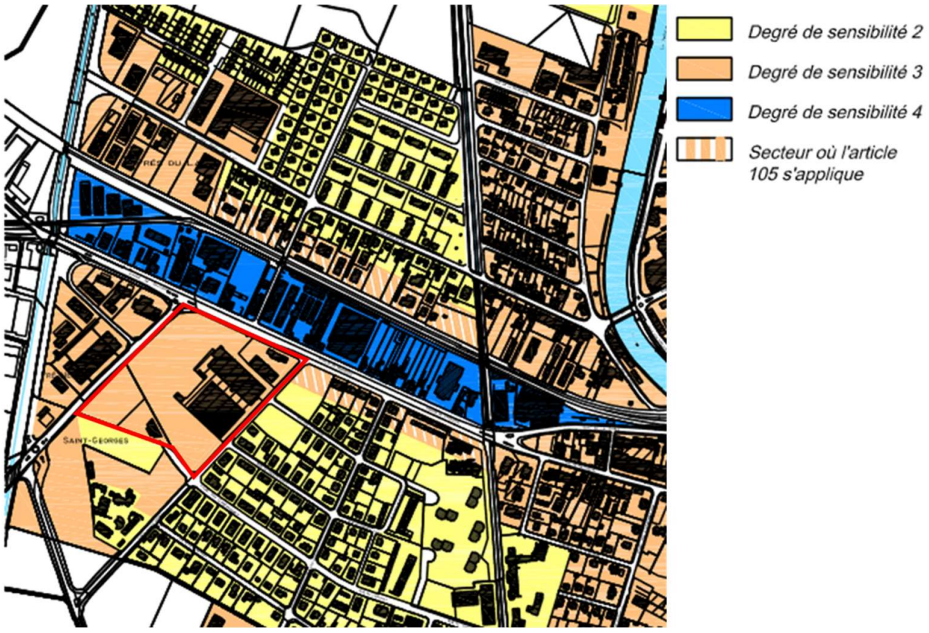


Figure 16 : Zone de sensibilité au bruit du quartier de Verdan [22]

Au niveau énergétique, les pompes à chaleur air/eau ont des rendements annuels qui peuvent être jusqu'à 30% inférieurs aux pompes à chaleur sol/eau, ce qui se traduit par une plus forte consommation d'électricité. En revanche, les pompes à chaleur air/eau sont en principe plus faciles à installer que les pompes à chaleur sol/eau.

Conclusion

L'énergie de l'air présente un potentiel à prendre en considération en l'absence de possibilités d'approvisionnement renouvelable recourant à des systèmes plus performants. Ceci étant, les puissances de chaleur élevées en jeu dans le présent quartier rendent la mise en place de pompes à chaleur air/eau compliqué.

5.6 Rejets thermiques

Il n'y a pas de rejets thermiques importants valorisables à proximité du quartier. En ce qui concerne le quartier lui-même, seuls les bureaux pourraient émettre des rejets valorisables. Ces rejets n'étant cependant générés qu'en été, ils ne pourraient être utilisés que pour générer de l'ECS, à moins que des stocks énergétiques puissent être mis en place (cf. la section sur la géothermie).

Conclusion

En l'état actuel des connaissances sur les futures affectations du quartier de Verdan, on peut tout au plus imaginer que les rejets thermiques ne pourront que ponctuellement être exploités pour le quartier de Verdan. Ils ne pourront en aucun cas être l'élément structurant ou déclencheur d'une stratégie d'approvisionnement énergétique à l'échelle du quartier dans son ensemble.

5.7 Lac de Neuchâtel

Le Lac de Neuchâtel représente un réservoir énergétique remarquable. L'énergie comprise dans l'eau du lac peut être valorisée de plusieurs manières différentes :

1. Pour le chaud : L'eau du lac peut soit alimenter une pompe à chaleur centralisée, qui dessert un chauffage à distance (Figure 17), soit être acheminée par conduites vers des pompes à chaleur décentralisées, qui alimentent directement les bâtiments dans lesquels elles sont placées (Figure 18). A titre d'exemple on peut citer le CAD de l'EPFL pour l'option centralisée, ou les réseaux de GLN (Genève-Lac-Nations) et de la Tour-de-Peilz pour la variante décentralisée.
2. Pour le froid : L'eau du lac est acheminée vers les bâtiments pour fournir du froid soit en mode free-cooling, soit en servant de source froide au condenseur des groupes froid. A titre d'exemple on peut citer le réseau Génilac® dans le Canton de Genève, qui combine les deux modes de fonctionnement.

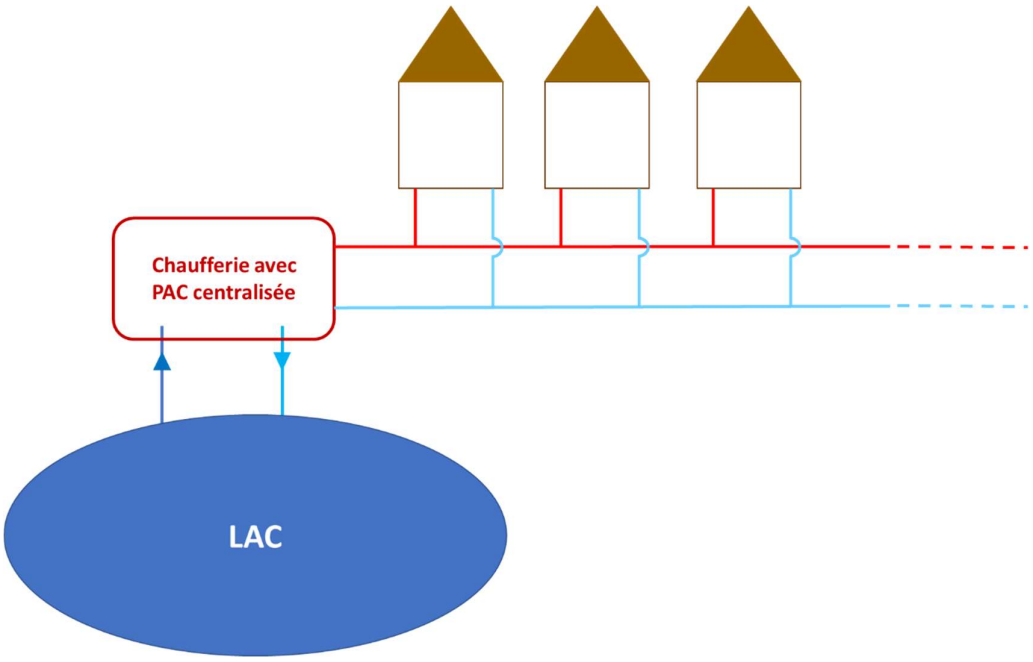


Figure 17 : Option centralisée

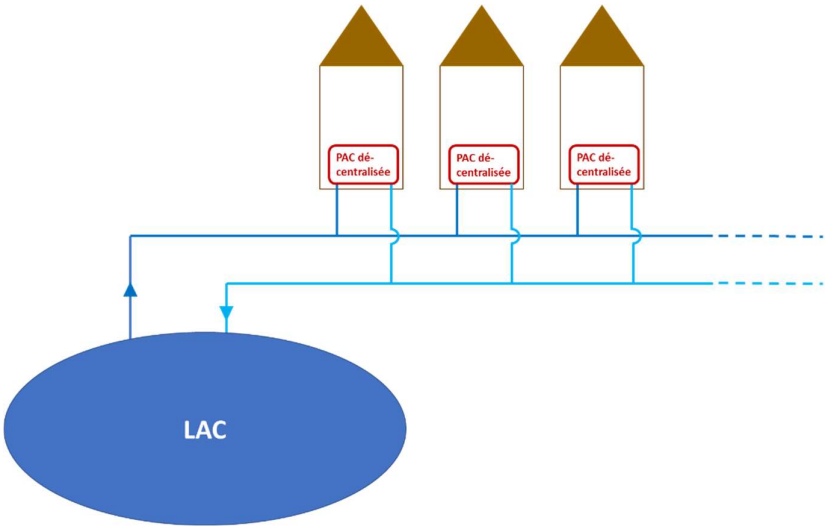


Figure 18 : Option décentralisée

L'étude de la mise en place d'un réseau à partir du lac dépasserait le cadre de la présente étude. On peut néanmoins affirmer que :

1. Le quartier de Verdan à lui seul ne pourrait rentabiliser un investissement relatif à une station de pompage d'eau du lac. Il faudrait au contraire qu'un tel projet de réseau soit initié à l'échelon de la Ville. Or les quartiers proches du Lac de Neuchâtel, qui sont situés entre le lac lui-même et le quartier de Verdan, sont destinés à être chauffés par les rejets de la STEP et non par l'eau du lac.
2. La bathymétrie du Lac de Neuchâtel montre un profil relativement plat du fond du lac, et donc a priori peu propice à la mise en place d'une boucle d'eau (plus la prise d'eau peut être placée profondément, plus la température est stable au long de l'année). Une précédente étude réalisée par la Ville d'Yverdon-les-Bains avait du reste déjà analysé cette problématique.

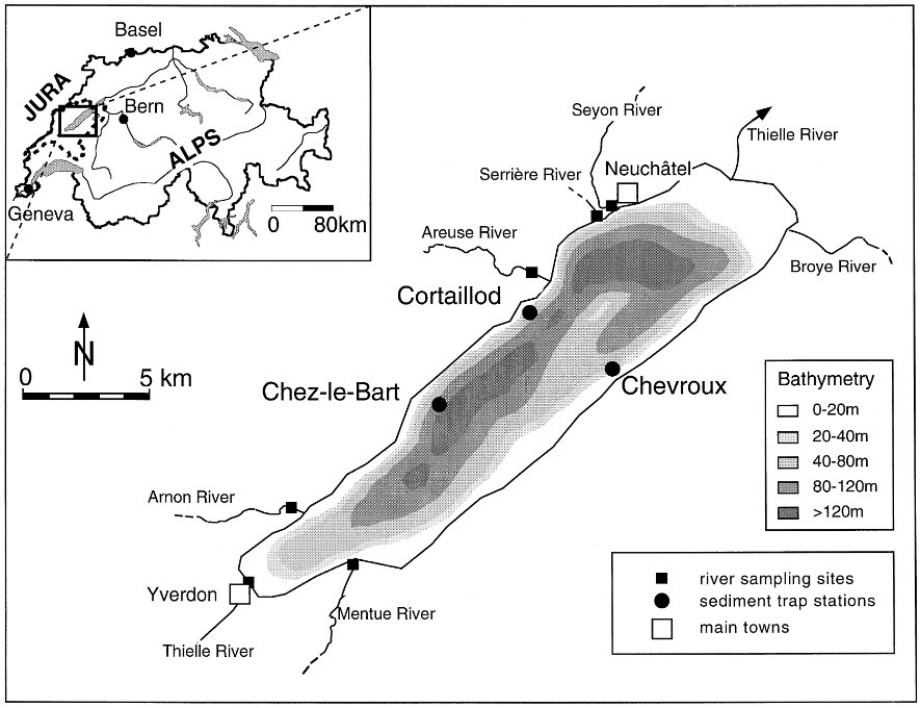


Figure 19 : Profil bathymétrique du Lac de Neuchâtel [18]

Conclusion

Si on ne peut totalement exclure que le lac pourrait représenter un potentiel intéressant, l'étude de cette option doit faire l'objet d'un mandat à plus grande échelle que le CET. Cette ressource ne sera donc pas analysée plus en détail ici.

5.8 Energie éolienne

L'environnement urbain dans lequel se situe le quartier n'est pas propice à la mise en place d'éoliennes. De plus, avec une vitesse du vent annuelle moyenne inférieure à 5 m/s à 100 m au-dessus du sol à Yverdon (cf. Figure 20, [23]), Yverdon et son voisinage immédiat ne figurent clairement pas parmi les sites prioritaires pour la mise en place d'éoliennes dans la Canton de Vaud.

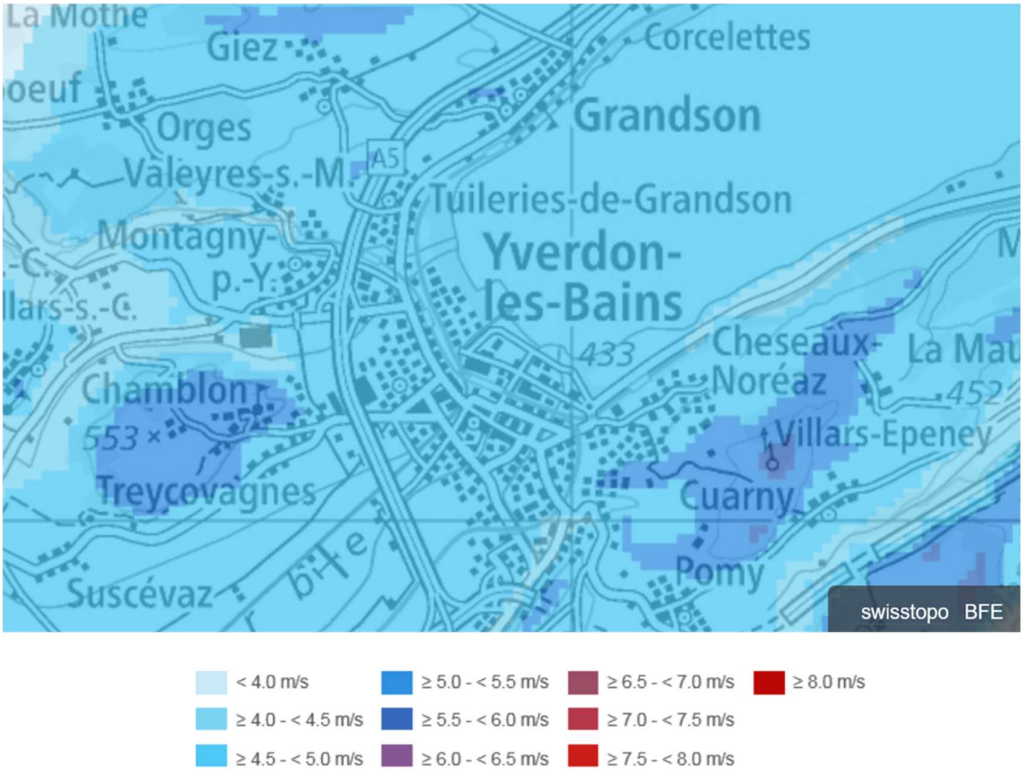


Figure 20 : Vitesse annuelle moyenne du vent à Yverdon [23]

5.9 Synthèse des ressources

La synthèse des ressources analysées dans le cadre du quartier de Verdan fait état des potentiels suivants :

1. Energie solaire : potentiel intéressant,
2. Géothermie : potentiel a priori intéressant (étude plus détaillée requise),
3. Eau de source : potentiel pas exploitable (source protégée),
4. Bois : potentiel intéressant mais pas prioritaire au vu de la planification énergétique communale,
5. Air : potentiel intéressant mais potentiellement compliqué à valoriser (caissons d'insonorisation),
6. Rejets thermiques : potentiels ponctuels au niveau de certains bâtiments,
7. Lac : pas de potentiel à ce niveau de l'étude,
8. Energie éolienne : pas de potentiel.

6 Scénarios d'approvisionnement

Cette section est consacrée à l'élaboration de différents scénarios d'approvisionnement (sections 6.1 à 6.4) et à leur comparaison (section 7). Ces scénarios sont basés sur la mise en adéquation des besoins et des ressources disponibles.

Remarque : Il convient de rappeler ici que le quartier de Verdan ne sera pas construit en une fois, mais qu'il y aura un phasage qui s'étendra possiblement sur plusieurs années. Ce phasage n'est cependant pas connu à l'heure de rédaction du présent rapport. Ceci dit, quel que soit le scénario d'approvisionnement retenu, ce dernier devra pouvoir se réaliser en plusieurs étapes.

6.1 Scénario « de base »

Le scénario « de base » comprend des chaudières à gaz pour le chauffage et 70% de l'ECS, des panneaux solaires thermiques pour satisfaire 30% de l'ECS, des groupes froid à compression, des panneaux photovoltaïques pour satisfaire 20% des besoins d'électricité liés aux techniques du bâtiment et 50% des besoins d'électricité liés aux groupes froid, et l'électricité du réseau pour les besoins électriques restant. Ce scénario correspond en quelque sorte au « minimum légal » encore autorisé, étant acquis que les chauffage de bâtiments alimentés par du gaz devront être remplacés d'ici 2050 au plus tard, en vertu de la Loi sur le Climat et l'Innovation adoptée en votation populaire en juin 2023. Afin de pouvoir s'affranchir totalement des énergies renouvelables pour le chauffage, ce scénario doit impérativement comprendre des constructions de type HPE. Ce scénario est représenté dans la Figure 21 ci-dessous.

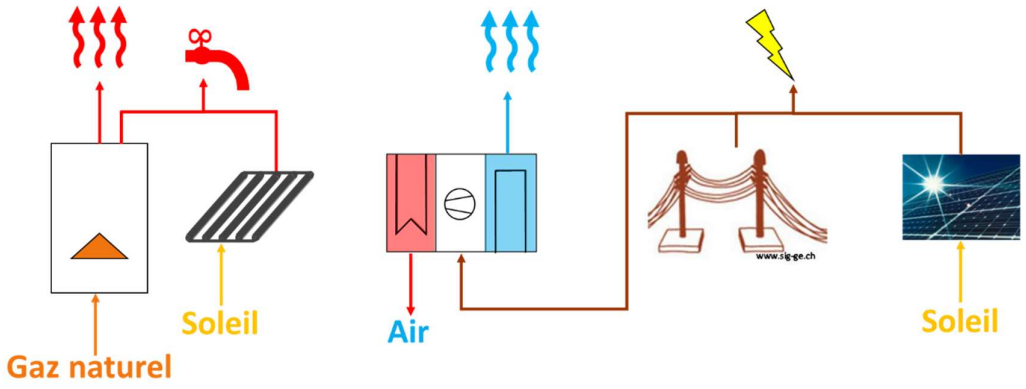


Figure 21 : Scénario « de base »

Avantages / inconvénients

Les avantages de ce scénario sont sa facilité de mise en œuvre et son indépendance totale par rapport au phasage des travaux. L'inconvénient majeur est évidemment ses mauvaises performances environnementales et le fait que les chaudières à gaz devront être remplacées à terme. De plus, ce scénario est très dépendant d'une ressource énergétique importée (le gaz naturel).

6.2 Scénario « géothermie »

Comme son nom l'indique, le scénario « géothermie » a pour but de valoriser autant que possible l'énergie du sous-sol. Comme on l'a vu dans la section 5.2, il existe deux types de valorisation possible de la géothermie : par sondes géothermiques et par pompage d'eau dans l'aquifère. Dans les deux cas,

une boucle type boucle d'anergie devrait idéalement connecter les bâtiments et la « station géothermale » (que cette station soit un champ de sondes ou un pompage dans l'aquifère), permettant ainsi de fourni :

1. la chaleur pour le chauffage et l'ECS via des pompes à chaleur décentralisées (placées directement dans les bâtiments),
2. le froid via des simples échangeurs ou via des groupes froid décentralisés (placés directement dans les bâtiments), selon les niveaux de température requis par les consommateurs et disponibles (dans le sous-sol ou l'aquifère).

L'électricité serait fournie en partie par des panneaux photovoltaïques (pour 20% des besoins liés techniques du bâtiment et 50% des besoins liés aux groupes froid, le cas échéant) et en partie par l'électricité du réseau. A noter que si le froid peut être fait par free-cooling, il ne faut pas de panneaux photovoltaïques pour le froid.

On notera enfin que grâce à l'article 28a de la loi vaudoise sur l'énergie (LVLEne), on pourrait s'affranchir des panneaux solaires thermiques pour l'ECS, le réseau (la boucle d'anergie) étant majoritairement alimenté par une énergie renouvelable (la géothermie).

Ce scénario est décrit dans la figure ci-dessous :

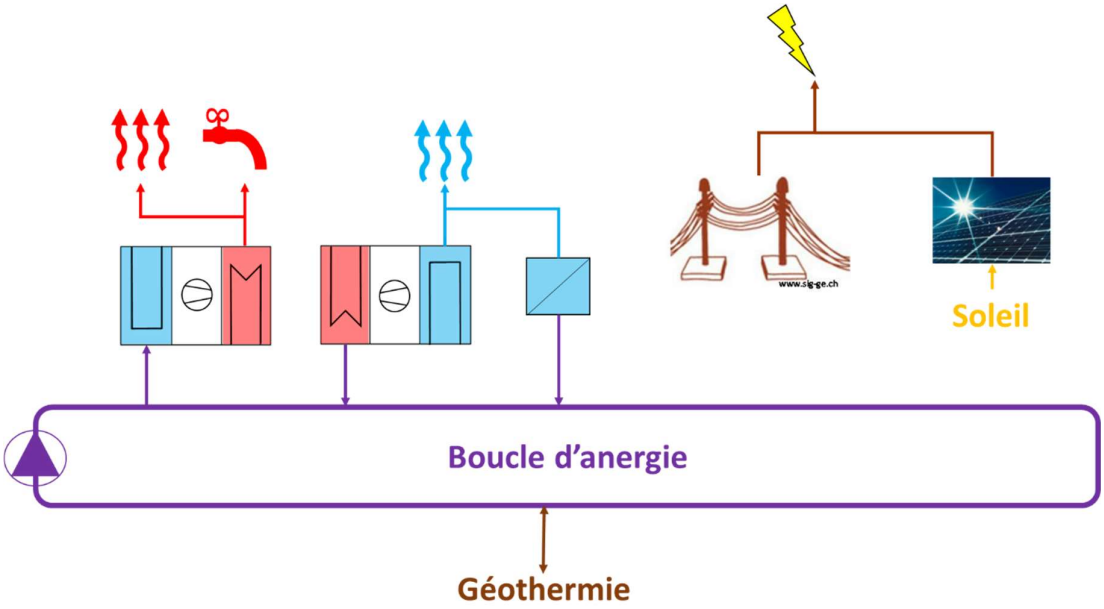


Figure 22 : Scénario « géothermie »

Avantages / inconvénients

Les avantages de ce scénario sont ses performances environnementales et les possibilités de synergies entre consommateurs de chaud et de froid (valorisation des rejets thermiques possible). De plus, il ne nécessite aucune combustion (gaz ou bois), évitant ainsi toute émission sur place. Les inconvénients sont, d'une part, que ce scénario doit être planifié, voire même être en partie mis en place, dès l'arrivée des premiers locataires (du moins en partie). Il faut donc s'assurer dès le début, qu'à terme, les bâtiments seront bien tous occupés comme prévu. D'autre part, dans le cas de la valorisation de la géothermie par des sondes, il faut veiller à garder un équilibre entre le chaud et le froid. Enfin, des

études exploratoires doivent encore être menées, et le potentiel ne sera pas exploitable avant 2030 environ, s'il est confirmé.

6.3 Scénario « bois »

Comme son nom l'indique, le scénario « bois » a pour but de valoriser autant que possible le bois. Le bois alimenterait une chaufferie connectée à un CAD, qui fournit la chaleur pour le chauffage et l'ECS aux bâtiments via des échangeurs à chaleur. En ce qui concerne le froid, ce dernier serait fourni grâce à des groupes froid décentralisés (placés directement dans les bâtiments). L'électricité serait fournie en partie par des panneaux photovoltaïques (pour 20% des besoins liés techniques du bâtiment et 50% des besoins liés aux groupes froid), et en partie par l'électricité du réseau.

On notera que, tout comme pour le scénario « géothermie », grâce à l'article 28a de la loi vaudoise sur l'énergie (LVLEne) on pourrait s'affranchir des panneaux solaires thermiques pour l'ECS, le CAD étant majoritairement alimenté par une énergie renouvelable.

Ce scénario est décrit dans la figure ci-dessous :

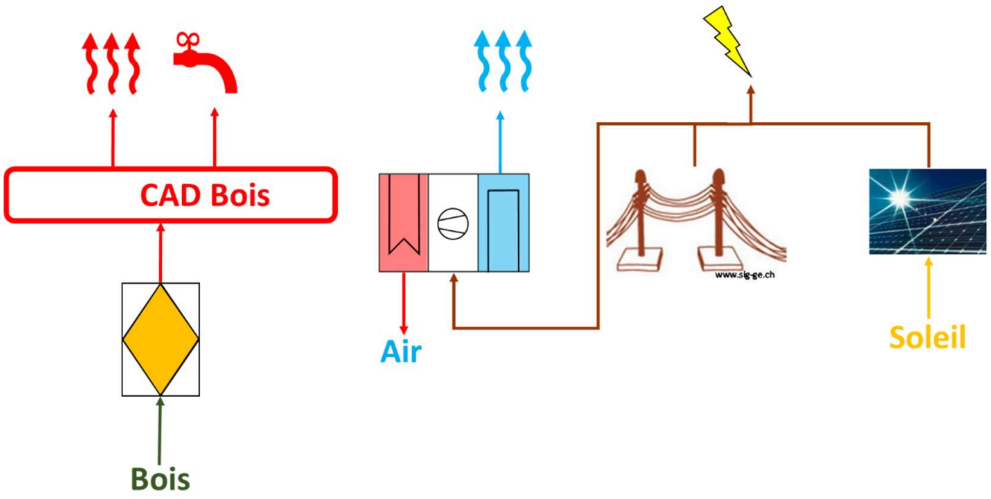


Figure 23 : Scénario « bois »

Avantages / inconvénients

L'avantage de ce scénario est ses performances environnementales. Ses principaux inconvénients sont, d'une part, le fait qu'il doit être mis en place dès l'arrivée des premiers locataires (du moins en partie), sans pouvoir tenir compte du phasage, et, d'autre part, les odeurs possibles liées à la combustion du bois. De plus, il faut réserver une place non négligeable pour le stockage des copeaux, dans une zone déjà limitée en termes de constructions sous-terraines (présence de la nappe).

6.4 Scénario « air »

Comme son nom l'indique, la principale source d'énergie du scénario « air » est l'air. Des pompes à chaleur seraient placées en toiture de chacun des bâtiments, avec, si possible, une valorisation des rejets thermiques du bâtiment lorsqu'il y a simultanéité entre besoins de chaleur et de froid. On pense ici notamment aux bâtiments de bureaux qui sont rafraîchis en été et qui nécessite un minimum d'eau chaude sanitaire. Pour les 30% d'ECS à fournir avec des panneaux solaires, on considère des panneaux solaires thermiques. A noter cependant que dans ce cas précis, les 30% à fournir par des panneaux solaires pourraient l'être par des panneaux photovoltaïques, (RLVLEne, art. 28, alinéa 4). En ce qui

concerne le froid, ce dernier pourrait être fourni en inversant le sens de fonctionnement des pompes à chaleur. L'électricité serait fournie en partie par des panneaux photovoltaïques (pour 20% des besoins liés aux techniques du bâtiment et 50% des besoins liés aux groupes froid, le cas échéant), et en partie par l'électricité du réseau.

Ce scénario est décrit dans la figure ci-dessous :

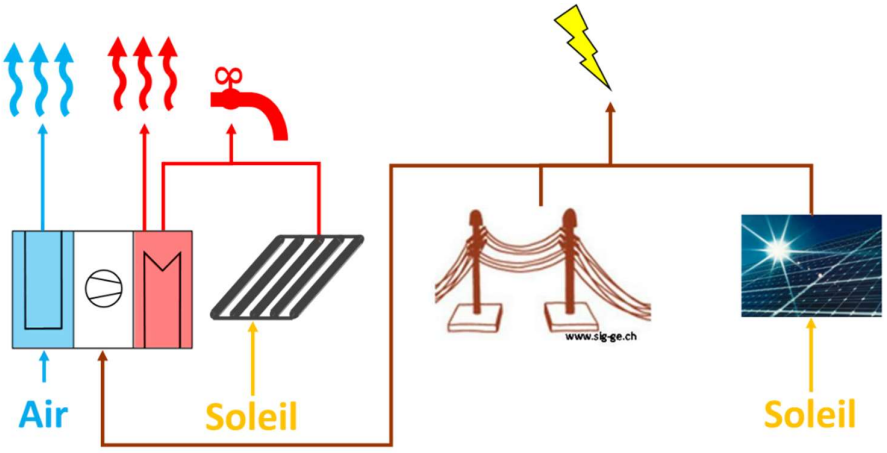


Figure 24 : Scénario « air »

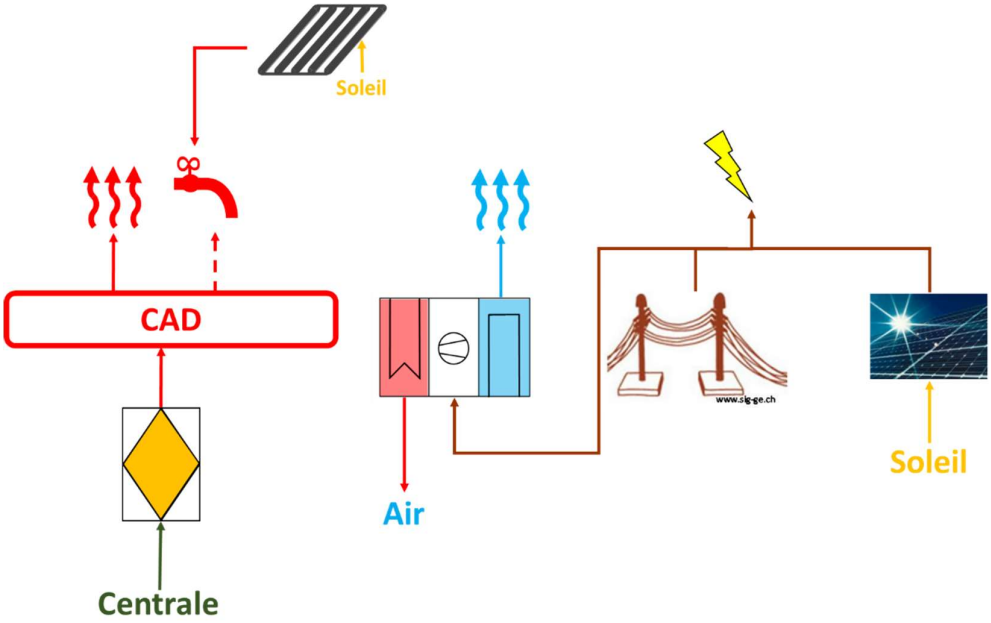
Avantages / inconvénients

Les avantages de ce scénario sont son indépendance totale par rapport au phasage des travaux, et ses bonnes performances environnementales. En revanche, il est important de relever que, si ce scénario peut paraître attractif à première vue, il présente un inconvénient non négligeable lié au bruit. En réalité, après discussion avec des fournisseurs, il semble que le bruit engendré par les pompes à chaleur nécessitera presque obligatoirement la mise en place de caissons d'insonorisation (notamment à cause de la proximité de logements et d'appartements protégés). En effet, étant donné le nombre de pompes à chaleur en jeu (une par bâtiment) et les puissances requises, les nuisances sonores ne pourront pas être négligées. Or, s'il apparaît que cette solution est tout-à-fait faisable techniquement, le prix lié aux caissons d'insonorisation peut rapidement s'avérer prohibitif (augmentation de 50% ou plus de l'investissement initial de la pompe à chaleur, selon le niveau d'insonorisation requis).

6.5 Scénario « CAD »

Comme indiqué dans la section 3.2.3, une connexion à un CAD ne peut pas être totalement exclue à ce stade. Le cas échéant, des échangeurs de chaleur seraient installés dans les différents bâtiments, pour satisfaire les besoins de chauffage, en transférant la chaleur du CAD aux bâtiments respectifs. Pour les 30% d'ECS à fournir avec des panneaux solaires, selon le type de CAD, on pourrait s'affranchir de l'obligation de mettre des panneaux solaires thermiques. Ceci reste cependant à être confirmé. En ce qui concerne le froid, ce dernier devrait être fourni à l'aide de groupes froids. L'électricité serait fournie en partie par des panneaux photovoltaïques (pour 20% des besoins liés aux techniques du bâtiment et 50% des besoins liés aux groupes froid, le cas échéant), et en partie par l'électricité du réseau. A noter qu'au vu du phasage des travaux, et selon la date à laquelle les premiers bâtiments devraient être raccordés, il faudra sans doute négocier une solution transitoire avec la société Y-CAD (ce qui est cependant usuel et pas nécessairement rédhibitoire).

Ce scénario est décrit dans la figure ci-dessous :



7 Comparaison entre les scénarios

Cette section est consacrée à la comparaison des scénarios décrits dans la section 6 ci-dessus, à l'aide de critères environnementaux et économiques. Avant de comparer ces scénarios, il convient cependant de faire les remarques suivantes :

1. Le scénario d'approvisionnement basé sur le CAD n'est pas analysé dans ce chapitre, en effet, trop d'incertitudes demeurent pour pouvoir faire une évaluation pertinente (source d'approvisionnement du CAD, solutions intermédiaires provisoires cas échéant,…). Ceci dit, si une extension du CAD devait pouvoir être réalisée, alors le CAD serait, en vertu de la LVLEn, prioritaire sur toutes les autres options.
2. Au niveau de planification auquel le CET est réalisé, les scénarios d'approvisionnement permettent avant tout de mettre en évidence les ressources d'énergie renouvelables les plus pertinentes pour le quartier, voire de s'assurer que les conditions nécessaires à la valorisation de ces ressources seront garanties dans les niveaux de planification inférieurs. Le niveau de détail de ces scénarios devra cependant être affiné et ne correspond en aucun cas au niveau requis pour une exécution.
3. Plusieurs variantes sont possibles, par rapport aux différents scénarios. A titre d'exemple on peut citer :
    a. le degré de récupération des rejets thermiques, liés par exemple au rafraîchissement estival, pour la production d'ECS (valorise-t-on au maximum les rejets thermiques ou non ?) ;
    b. la surface de panneaux solaires (photovoltaïques et /ou thermiques) mis en places (s'arrête-t-on au minimum légal requis ou va-t-on plus loin ?).

    Ces variantes ne pourront cependant être analysées précisément qu'au stade des concepts détaillés des bâtiments.

7.1 Critères environnementaux

La comparaison relative aux critères environnementaux se fait en évaluant les quantités d'émissions de gaz à effet de serre (en équivalent CO_2), les émissions de NOx, la part d'énergie renouvelables et le rendement énergétique. Les hypothèses suivantes sont faites :

1. Rendement des installations :

Chaudière à gaz	95%	[29]
Chaudière à bois (copeaux)	85%	[26]
Rendement exergétique des pompes à chaleur sur les sondes	55%	
Rendement exergétique des pompes à chaleur sur l'aquifère	60%	[33]
Rendement exergétique des pompes à chaleur air/eau	40%	[33]
Rendement des groupes froid	3.5	[33]

Tableau 10 : Rendements des installations

2. Paramètres environnementaux ([34], [35], [36]) :

Agent énergétique	Facteur d'énergie primaire non renouvelable [-]	Emissions de gaz à effets de serre [kg/MWh]	Emissions de NOx [mg/MWh]
Gaz naturel	1.11	237.6	57'600
Bois (copeaux)	0.06	10.8	432'000
Panneaux solaires thermiques	0.086	14.8	N.A.
Panneaux PV	0.4	93.6	N.A.
Electricité du réseau (Yverdon)[5]	0.22	16.9	N.A.

Tableau 11 : Valeurs environnementales de base

Remarque : Les valeurs des paramètres environnementaux dépendent grandement des hypothèses faites pour déterminer ces valeurs. Malheureusement ces hypothèses ne sont pas toujours clairement explicitées dans les différentes références littéraires, raison pour laquelle on a essayé de limiter au maximum le nombre de références. Il n'a cependant malheureusement pas été possible de définir toutes les valeurs à l'aide d'une seule référence.

3. L'électricité de pompage pour la boucle d'anergie est équivalente à 7% de l'énergie utile délivrée et l'électricité de pompage de l'aquifère de 7% de l'énergie utile délivrée.

Les quantités d'énergie primaire non renouvelables sont indiquées dans le tableau ci-dessous, pour chacun des scénarios, et en fonction des agents énergétiques utilisés. Il convient de préciser que :

1. Les consommations d'énergie primaire liées à l'électricité (issue du réseau ou de panneaux photovoltaïques) comprennent l'ensemble des consommations d'électricité (techniques du bâtiment, équipements, PAC, pompes de circulation dans le réseau).
2. Pour le scénario « géothermie », on a distingué entre une valorisation par sondes ou par pompage de l'eau de l'aquifère (l'aquifère se situant sous le périmètre de Verdan). Pour le froid, on a fait l'hypothèse qu'il fallait recourir à des groupes froid rejetant l'énergie dans la boucle d'anergie aux environ de 35°C (le free-cooling n'étant pas possible eu égard aux températures de l'aquifère).
3. On a limité la comparaison aux constructions de type HPE, car c'est le type de construction le plus probable. Les tendances resteraient cependant identiques pour des constructions de type THPE.

[5] Valeurs selon le mix moyen délivré par les services industriels d'Yverdon en 2023 [34], à savoir : 87,7% hydraulique, 2,2% solaire, 6% énergies renouvelables bénéficiant de mesures d'encouragement et 4,1% de nucléaire.

	Scénario				
Ressource mobilisée	de base	géothermie aquifère	géothermie sondes	bois	air
Gaz naturel	3 717	0	598	0	0
Sous-sol (géothermie)	0	0	0	0	0
Bois	0	0	0	291	0
Soleil (thermique)	24	0	0	0	24
Electricité PV	104	104	89	104	104
Electricité mix Yverdon	293	501	498	348	498
TOTAL [MWh/an]	**4 138**	**606**	**1 184**	**743**	**627**

Tableau 12 : Consommations d'énergie primaire non renouvelables pour chacun des scénarios, en fonction des agents énergétiques requis [MWh/an]

Sans surprise, on constate que c'est le scénario « de base » qui consomme clairement le plus d'énergie primaire non renouvelable. Le scénario « géothermie aquifère » est, quant à lui, celui qui consomme le moins d'énergie primaire non renouvelable. En effet, contrairement au scénario « géothermie avec sondes », on n'a pas considéré d'appoint gaz. (N.B. : En théorie, techniquement, on pourrait s'affranchir de l'appoint gaz dans le scénario « géothermie avec sondes ». Il faudrait cependant alors installer le double de sondes, renchérissant considérablement ce scénario.)

Le pourcentage d'énergie renouvelable pour chacun des scénarios est indiqué dans le tableau ci-dessous, sur le même principe que pour l'énergie primaire non renouvelable (N.B. : Le mix électrique d'Yverdon-les-Bains a été considéré 100% renouvelable [43]):

Scénario	de base	géothermie aquifère	géothermie sondes	bois	air
	53%	100%	92%	100%	100%

Tableau 13 : Pourcent d'énergies renouvelables

On constate que, la seule énergie non renouvelable étant le gaz naturel et un tout petit peu d'énergie nucléaire dans le mix électrique, la plupart des scénarios offrent des bonnes performances et contribuent largement à la politique énergétique de la Ville.

Les émissions de gaz à effet de serre pour chacun des scénarios sont indiquées dans le tableau ci-dessous, sur le même principe que pour l'énergie primaire non renouvelable :

	Scénario				
Ressource mobilisée	de base	géothermie aquifère	géothermie sondes	bois	air
Gaz naturel	795	0	128	0	0
Sous-sol (géothermie)	0	0	0	0	0
Bois	0	0	0	48	0
Soleil (thermique)	4	0	0	0	4
Electricité PV	30	30	25	30	30
Electricité mix Yverdon	22	38	38	27	38
TOTAL [tonne/an]	**851**	**68**	**191**	**104**	**72**

Tableau 14 : Emissions des gaz à effet de serre pour chacun des scénarios, en fonction des agents énergétiques requis [tonne/an]

Tout comme pour l'énergie primaire, c'est le scénario de base qui émet, et de loin, le plus de gaz à effet de serre. Là également, c'est l'appoint gaz qui pénalise un peu le scénario « géothermie » avec sondes. A noter aussi qu'à part le scénario « de base », tous les scénarios respectent les objectifs climatiques de la Commune, pour les émissions directes (les émissions indirectes ne peuvent pas être évaluées à ce stade).

Les émissions de NOx pour chacun des scénarios sont indiquées dans le tableau ci-dessous, sur le même principe que pour l'énergie primaire non renouvelable :

	Scénario				
Ressource mobilisée	de base	géothermie aquifère	géothermie sondes	bois	air
Gaz naturel	202	0	32	0	0
Sous-sol (géothermie)	0	0	0	0	0
Bois	0	0	0	1 932	0
Soleil (thermique)	0	0	0	0	0
Electricité PV	0	0	0	0	0
Electricité mix Yverdon	0	0	0	0	0
TOTAL [kg/an]	**202**	**0**	**32**	**1 932**	**0**

Tableau 15 : Emissions de NOx pour chacun des scénarios, en fonction des agents énergétiques requis [kg/an]

Les émissions de NOx étant le résultat d'une combustion, seuls les scénarios qui comprennent une chaudière, à savoir les scénarios « de base » et « bois » émettent des NOx. Sans surprise, c'est le scénario « bois » qui émet le plus de NOx.

En conclusion, en ce qui concerne les critères environnementaux, c'est clairement le scénario « géothermie aquifère » avec pompage de l'eau de l'aquifère, qui est le plus performant, directement suivi par le scénario « air ». En effet, le scénario « géothermie aquifère » et celui qui présente les meilleures performances, quel que soit le paramètre environnemental.

7.2 Critères économiques

Eu égard à la grande variation des coûts (tant pour les investissements que pour l'électricité et le gaz) liés à la situation géopolitique tendue ainsi qu'aux nombreuses hypothèses simplificatrices qui ont dû être faites à ce stade, cette analyse économique est à considérer avec la plus grande prudence.

Comme mentionné au début de la section 6, le quartier ne sera pas réalisé en une seule étape, mais selon un certain phasage. Ainsi, selon le scénario choisi, certaines infrastructures devront être pensées dès le début pour l'ensemble du quartier (on pense notamment au réseau de distribution de l'énergie, soit la boucle d'anergie, dans le cas des scénarios « géothermie »). Ces infrastructures nécessitent des investissements conséquents, qui ne pourront cependant pas être rentabilisés avant que l'ensemble des futurs locataires ne prennent place dans le quartier. Les estimations de prix ne tiennent cependant pas compte de ce phasage, et sont données en faisant l'hypothèse que le quartier est construit et occupé dans son intégralité. De plus, les autres hypothèses suivantes ont été faites :

1. Le scénario « géothermie aquifère » a malheureusement dû être exclu de la comparaison, car des incertitudes demeurent (niveaux de température, débits) qui rendent toute estimation réaliste impossible à ce stade.
2. Le scénario basé sur une connexion à l'un des CAD de la Ville d'Yverdon a également dû être exclu, pour les mêmes raisons qu'évoquées à la section 7.1
3. Les prix des installations comprennent la livraison, le montage et l'ingénierie, mais pas la TVA. Les prix des énergies (électricité de réseau, gaz, copeaux) ne comprennent pas la TVA.
4. Les puissances et les énergies sont considérées pour l'ensemble du site, sans faire de détail en fonction du phasage et des différents bâtiments.
5. L'électricité produite par les panneaux photovoltaïques pour alimenter 50% de l'électricité des groupes froid n'a que des coûts fixes (investissement, livraison, montage,…) mais pas de coûts

variables (auto-consommation sur place). La même chose est valable pour les 20% d'électricité produite par les panneaux photovoltaïques pour couvrir les besoins électriques des techniques du bâtiment.

6. On ne tient pas compte des éventuelles subventions. En effet ces subventions dépendent des puissances en jeu notamment, et on ne connaît pas, à ce stade, les puissances définitives qui seront installées (comme par exemple pour les panneaux photovoltaïques). On ne sait pas non plus si l'énergie sera délivrée par l'intermédiaire d'une entreprise de services énergétiques qui fournira l'énergie à l'ensemble du quartier, ou si chaque propriétaire aura ses propres installations, indépendamment les uns des autres.
7. Les coûts de distribution de la chaleur, du froid et de l'électricité à l'intérieur des bâtiments eux-mêmes, ne sont pas compris. En effet, non seulement on peut faire l'hypothèse que ces coûts devraient être relativement identiques pour tous les scénarios, et n'impacteraient donc pas sensiblement le résultat de la comparaison, mais en plus le niveau de détail du CET ne permet pas de les estimer.
8. Pour les scénarios nécessitant des panneaux solaires pour satisfaire 30% des besoins d'ECS, on fait l'hypothèse que le quartier est à considérer comme un ensemble. On considère donc la consommation et la puissance globale pour déterminer le prix du gaz [38].
9. Pour le scénario « air », on a considéré des pompes à chaleur pour produire la chaleur et des groupes froid pour produire le froid, sans tenir compte, à ce stade, d'éventuelles synergies (pompes à chaleur réversible par exemple). En effet seule l'étude détaillée permettra de savoir si, et à quel point, les rejets de chaleur pourront être valorisés (et donc l'investissement être mutualisé).
10. Les coûts de raccordement aux réseaux (gaz, le cas échéant, et électricité), ne sont pas considérés.
11. Les coûts d'investissement des installations ont été estimés grâce à des coûts spécifiques (CHF/kW par exemple), résultant de statistiques réalisées à l'aide de valeurs fournies par des fournisseurs pour différents projets ([39], [40], [41]), ou des valeurs trouvées dans la littérature ([26], [42]).
12. Pour les prix des énergies (électricité et gaz naturel) on a considéré les valeurs indiquées dans la littérature ([37], [38]).
13. Le taux d'intérêt est de 4%.
14. Les durées de vie des installations et le pourcentage considéré pour l'entretien et la maintenance sont tirées des normes [44]-[45], et de la littérature [46].

On rappellera enfin qu'à ce stade de l'étude, l'analyse économique ne sert qu'à donner un aperçu de l'ordre de grandeur des coûts attendus pour les différents scénarios, afin de déterminer si l'un des scénarios est franchement plus cher que les autres ou pas. Le niveau de détails et le cadre de cette étude ne permettent en effet pas de calculer des coûts précis. Ces coûts n'ont donc qu'une valeur indicative.

Les investissements et les coûts de production sont indiqués dans le tableau ci-dessous pour chacun des scénarios, pour des constructions de type HPE. Tout comme pour la comparaison à l'aide des critères environnementaux, on s'est limité ici aux constructions de type HPE. Enfin, on notera que pour la production de froid, ainsi que pour l'électricité liée aux techniques du bâtiment et aux équipements, les coûts sont identiques pour tous les scénarios (à l'exception du froid pour le scénario « géothermie » avec sondes), étant donné qu'ils sont produits de manière identique dans tous les cas.

Scénario		de base	géothermie aquifère	géothermie sondes	bois	air
Investissement chaud	[CHF]	2 050 000	A définir	6 737 785	2 930 000	3 190 000
Investissement froid	[CHF]	890 000	A définir	455 056	890 000	890 000
Investissement électricité	[CHF]	570 000	A définir	570 000	570 000	570 000
TOTAL	[CHF]	3 510 000	A définir	7 762 841	4 390 000	4 650 000
Coût de la chaleur	[CHF/kWh]	0,14		0,25	0,17	0,18
Coût du froid	[CHF/kWh]	0,25		0,10	0,25	0,25
Coût de l'électricité	[CHF/kWh]	0,21		0,21	0,21	0,21

Tableau 16 : Coûts d'investissement et coûts de production des différentes énergies

Les coûts d'investissement du tableau ci-dessous comprennent les éléments suivants :

1. Scénario « de base » :
    a. Chaud : chaudières à gaz (incl. cheminée) et panneaux solaires thermiques pour les 30% d'ECS.
    b. Froid : groupes froid et panneaux photovoltaïques pour produire les 50% d'électricité liés aux groupes froid.
    c. Electricité : panneaux photovoltaïques pour produire les 20% d'électricité liés à l'éclairage et à la ventilation.
2. Scénario « géothermie » :
    a. Chaud : pompes chaleur, sondes, chaudières à gaz (incl. cheminée) et réseau de distribution.
    b. Froid : échangeur pour free-cooling.
    c. Electricité : panneaux photovoltaïques pour produire les 20% d'électricité liés aux techniques de bâtiment.
3. Scénario « air » :
    a. Chaud : pompes à chaleur (incl. caisson d'insonorisation) et panneaux solaires thermiques pour les 30% d'ECS.
    b. Froid : groupes froid et panneaux photovoltaïques pour produire les 50% d'électricité liés aux groupes froid.
    c. Electricité : panneaux photovoltaïques pour produire les 20% d'électricité liés à l'éclairage et à la ventilation.
4. Scénario « bois » :
    a. Chaud : chaufferie centralisée avec chaudière à bois, stockage des copeaux et réseau de distribution dans le quartier.
    b. Froid : groupes froid et panneaux photovoltaïques pour produire les 50% d'électricité liés aux groupes froid.
    c. Electricité : panneaux photovoltaïques pour produire les 20% d'électricité liés à l'éclairage et à la ventilation.

Comme on peut le voir dans le Tableau 16 ci-dessus, le scénario le moins cher est, sans surprise, le scénario « de base » (on se limite ici à la comparaison des coûts pour la chaleur, les besoins de chaleur étant largement dominants par rapport aux besoins de froid). Les deux scénarios « air » et « bois » suivent, quant au scénario « géothermie » avec sondes, il ferme la marche. On notera cependant que le scénario « bois » semble spécialement peu cher, si on compare les coûts estimés ici aux coûts réels pour les quelques installations pour lesquelles il existe un feed-back (0,19-0,23 CHF/kWh). Il faut savoir que, par rapport à ce scénario, il y a une grande incertitude par rapport aux coûts pour la chaufferie et le stock (maçonnerie notamment), qui dépendent de nombreux facteurs. Le scénario « air » comprend également une grande incertitude liée aux coûts des capots d'insonorisation, étant donné qu'il n'y a

pas vraiment d'exemple existant. Les 0,17 CHF/kWh pourraient donc également être sous-estimés, même s'ils sont déjà relativement élevés.

En conclusion on peut dire que le scénario le moins cher est le scénario « de base », suivi par les scénarios « bois » et « air », et enfin, en dernière position, le scénario « géothermie » avec sondes.

8 Synthèse et recommandations

Le tableau ci-dessous donne une synthèse de la comparaison des scénarios, en reprenant également les principaux avantages et inconvénients indiqués dans la section 6 (à noter que seuls les principaux avantages et inconvénients, à savoir ceux qui permettent de clairement distinguer un scénario des autres scénarios, ont été repris). Remarque : Plus il y a d'étoiles *, meilleur est le scénario. Les * mises entre parenthèses indiquent qu'il y a une grande incertitude liée à l'estimation du paramètre, eu égard au caractère novateur de la solution. Enfin, le scénario basé sur une connexion à l'un des CAD de la Ville d'Yverdon est également indiqué dans le tableau ci-dessous malgré le fait qu'il n'a pas fait l'objet d'une analyse dans les sections 7.1 et 7.2 ci-dessus. En effet, si une connexion devait s'avérer pertinente, non seulement elle serait légalement obligatoire, mais en plus elle ne sera pertinente que si elle économiquement et environnementalement pertinente (sans quoi elle ne se fera pas).

Scénario	Critères environnementaux	Critères économiques	Avantages / Inconvénients
« de base »	* En. Prim non ren. : 4'138 MWh/an	*** Prix de la chaleur : 0,14 CHF/kWh	• Facile à mettre en œuvre • Indépendance vis-à-vis du phasage des travaux • Dépendance au gaz
« géothermie aquifère »	(***) En. Prim non ren. : 606 MWh/an	(*) Prix de la chaleur : A définir	• Valorisation d'une ressource renouvelable locale pour le chaud • Aucune combustion • Phasage des travaux • Etudes exploratoires requises
« géothermie sondes »	** En. Prim non ren. : 1'184 MWh/an	* Prix de la chaleur : 0,25 CHF/kWh	• Valorisation d'une ressource renouvelable pour le chaud et le froid • Légère dépendance au gaz • Phasage des travaux
« bois »	** En. Prim non ren. : 743 MWh/an	** Prix de la chaleur : 0,17 CHF/kWh	• Valorisation d'une ressource renouvelable pour le chaud • Odeurs liées à la combustion • Place (volume construit) requise
« air »	*** En. Prim non ren. : 627 MWh/an	(**) Prix de la chaleur : 0,18 CHF/kWh	• Indépendance vis-à-vis du phasage des travaux • Grandes incertitudes liées à la mise en place de caissons d'insonorisation
« CAD »	(*)	(*)	• Facilité de mise en œuvre car gestion prise en charge par Y-CAD • Phasage des travaux • Incertitudes quant à la possibilité de connecter le quartier

Tableau 17 : Synthèse des scénarios d'approvisionnement

Le choix du scénario dépend grandement de l'importance donnée à chacun des critères (environnemental ou économique), ainsi qu'aux différents avantages/inconvénients. En effet, aucun scénario ne se détache clairement des autres, tous critères confondus. Si les études exploratoires sur l'aquifère confirment le potentiel supposé, alors ce scénario pourrait être intéressant (en tous cas sur

le plan environnemental). Si une connexion au CAD d'Yverdon s'avère pertinente, elle sera prioritaire car obligatoire. Si en revanche les études ne permettent pas de confirmer le potentiel de l'aquifère ou qu'une connexion au CAD n'est pas possible, alors les scénarios « géothermie sondes » ou « bois » devront être envisagés si on souhaite un scénario qui a déjà fait ses preuves à plusieurs reprises dans d'autres quartiers en Suisse. Le scénario « air » pourrait également être envisagé, après soumission du projet cependant à un fournisseur pouvant se porter garant par rapport aux caissons d'insonorisation.

Références

[1] http://www.yverdon-les-bains.ch/prestations-deladministration/agenda21/, accédé le 12 juillet 2017.

[2] Règlement sur la perception des indemnités communales liées à la distribution d'électricité, 2021.

[3] Politique climatique et énergétique 2014-2018, Yverdon-les-Bains.

[4] Planification énergétique communale d'Yverdon-les-Bains, rapport en cours d'élaboration par le CREM, extraits mis à disposition par le Service de l'Energie de la Ville d'Yvedon-les-Bains par courriel, le 23 février 2017.

[5] PQ Verdan / Yverdon-les-Bains, documents transmis par CCHE, juillet-novembre 2024.

[6] *Géothermie en Suisse – Une source d'énergie polyvalente*, suisse énergie, 2017.

[7] Communication par courriel, Alpgéo, 19 avril 2017.

[8] Directive Cantonale pour l'implantation de chauffage à bois du 1er juillet 2014, Département du Territoire et de l'Environnement du Canton de Vaud.

[9] http://www.vd.ch/fileadmin/user_upload/themes/environnement/energie/fichiers_pdf/ZIE_Yverdon.pdf, accédé le 28 avril 2017.

[10] http://www.vd.ch/themes/environnement/energie/chauffage/chauffage-a-bois/, accédé le 28 avril 2017.

[11] Communication personnelle DIREN, novembre 2014/novembre 2024.

[12] Documentation/information transmise par la Ville d'Yverdon, février-mai 2017.

[13] *Dimensionnement de sondes géothermiques pour le chauffage et le rafraîchissement*, Prof. Daniel Pahud, Cours donné le 16 juin 2011 à l'UNIGE.

[14] *Lösungen für wenig Platz,* Geothermie-Schweiz n°62, mars 2017.

[15] Energie-bois Suisse, présentation donnée en septembre 2014.

[16] http://www.vd.ch/fileadmin/user_upload/themes/environnement/air/fichiers_pdf/Annexe_TableauExigencesBois.pdf, téléchargé le 24 mai 2017.

[17] *Poussières fines : un fléau*, Office Fédéral de l'Environnement, des Forêts et du Paysage, 2005.

[18] *Monitoring detrital input and resuspension effects on sediment trap material using mineralogy and stable isotopes ($\delta^{18}O$ and $\delta^{13}C$) : the case of Lake Neuchâtel*, M.L.Filippi, P. Lambert, J.C. Hunziker, B. Kübler, Journal Paleo 140 (1998) 33-50, Elsevier, 1998.

[19] https://www.suisseenergie.ch/page/fr-ch/calculateur-solaire?p=17838,17963, accédé le 26 mai 2017.

[20] Capteurs solaires – Aide au dimensionnement, SuisseEnergie, 2015.

[21] *Ordonnance sur la protection contre le bruit* (ordonnance fédérale), version au 1er janvier 2015.

[22] https://www.yverdon-les-bains.ch/fileadmin/documents/ylb/Urbanisme/pdf/PGA_Plan_4_DS.pdf, accédé le 25 novembre 2024.

[23] http://wind-data.ch/windkarte/, accédé le 25 novembre 2024.

[24] http://www.aggloy.ch/wp/wp-content/uploads/aggloy_pr%C3%A9avis_PPDE_2013_11_chamard_montagny.pdf, accédé le 29 mai 2017.

[25] Modèle de prescription énergétique des cantons (MoPec), Edition 2014, Version française.

[26] QM Chauffage au bois – Manuel de planification, Energie-bois Suisse, traduction de 2010.

[27] *Utilisation de la chaleur du sol par des ouvrages de fondation et de soutènement en béton*, Documentation SIA D 0190, 2005.

[28] *Conditions d'utilisation standard pour l'énergie et les installations de bâtiment*, SIA CT 2024, 2006.
[29] http://www.vd.ch/index.php?id=7138, accédé le 23 mai 2017.
[30] *L'énergie thermique dans le bâtiment*, SIA 380/1, 2009.
[31] *L'énergie électrique dans le bâtiment*, SIA 380/4, 2006.
[32] *Certificat énergétique des bâtiments*, SIA CT 2031, 2009.
[33] Catalogues fournisseurs.
[34] https://www.yverdon-energies.ch/wp-content/uploads/2024/05/Marquage-electricite-2023-1.pdf, accédé le 8 janvier 2025.
[35] *Facteurs d'émissions des chauffages*, Fiche d'information du DETEC, juin 2024.
[36] *https://www.kbob.admin.ch/fr/donnees-ecobilans-dans-la-construction*, accédé le 08.01.2025.
[37] https://www.yverdon-energies.ch/wp-content/uploads/2024/10/EL-Tarifs-2025.pdf, accédé le 9 janvier 2025.
[38] https://www.yverdon-energies.ch/wp-content/uploads/2024/11/G-Tarifs-2025.pdf, accédé le 9 janvier 2025.
[39] WalterMeier, Communication personnelle.
[40] CTA, Communication personnelle.
[41] Hoval, communication personnelle.
[42] https://www.suisseenergie.ch/page/fr-ch/co%C3%BBt-dune-installation, accédé le 23 juin 2017.
[43] http://www.yverdon-energies.ch/professionnels/produits/electricite/marquage-electricite-pro/, accédé le 30 juin 2017.
[44] *Installations de ventilation et de climatisation – Bases générales et performances requises*, SIA 382/1, 2007.
[45] *Sondes géothermiques*, SIA 384/6, 2010.
[46] *Guide pratique pour les calculs de rentabilité*, Publications Ravel.
[47] http://www.aggloy.ch/au-sujet-agglo-y/, accédé le 11 juillet 2017.
[48] *Plan de quartier de Verdan – Analyse d'opportunités énergétiques – Géothermie*, Alpgeo, Juillet 2017.
[49] Alpgeo, communication personnelle.
[50] Conception cantonale de l'énergie, DGE-DIREN, 2019.
[51] Accélérer la transition énergétique vaudoise – Conception Cantonale de l'énergie, version 2019, Département du territoire et de l'environnement (DTE), Direction générale de l'environnement (DGE), Direction de l'énergie (DIREN).
[52] Stratégie du Conseil d'État vaudois pour la protection du climat Plan climat vaudois – 1ère génération, Juin 2020.
[53] Communication personnelle, Unité du Plan climat, Département des institutions, du territoire et du sport, janvier 2023.
[54] https://www.vd.ch/themes/environnement/climat/initiative-populaire-cantonale-pour-la-protection-du-climat, accédé le 30 juin 2023.
[55] https://www.yverdon-les-bains.ch/fileadmin/documents/ylb/Durabilite/pdf/YLB_PlanClimat.pdf, téléchargée le 29 juillet 2024.
[56] *Agenda 2030*, https://www.yverdon-les-bains.ch/agenda2030/a2030.php, accédé le 29 juillet 2024.
[57] https://www.yverdon-energies.ch/planification-energetique/, accédé le 29 juillet 2024.

[58] *Concept Energétique Territorial pour le site « Verdan », Yverdon*, Version 4, bureau focus-E Sàrl, mai 2018.
[59] Loi sur l'énergie, LVLEne, du 16 mai 2006, 730.01, entrée en vigueur le 1er mars 2022.
[60] Règlement d'application de la loi du 16 mai 2006 sur l'énergie, entrée en vigueur le 1er mars 2022, RLVLEne, 730.01.1.
[61] https://www.vd.ch/environnement/air/chauffages-controle-des-emissions/, accédé en novembre 2024.
[62] Directive Cantonale pour l'implantation de Chauffage à Bois, Département du territoire et de l'Environnement, Direction Générale de l'Environnement du canton de Vaud, 1er juillet 2020.
[63] Documentation/information transmise par la Ville d'Yverdon, novembre 2024.
[64] https://ycad.ch/cad-step/, accédé le 15 novembre 2024.
[65] Communication personnelle Commune d'Yverdon-les-Bains, août-novembre 2024.
[66] PQ Verdan / Yverdon-les-Bains, documents transmis par CCHE, novembre 2024.
[67] Communication personnelle Commune de Montagny, novembre 2024.
[68] Communication personnelle Y-CAD, mars 2025.