



Scénario de transition énergétique 2050.

**Secteur du bâtiment
Surface, chauffage et
climatisation**

Rapport technique

Mars 2021



Scénario de transition énergétique 2050.

Secteur du bâtiment – Surface, chauffage et climatisation

Rapport technique

David Moreau
Flavio Principi
Emmanuel Ravalet

Réalisé sous mandat de négaWatt
Mobil'homme, Av. de Sévelin 28, 1004 Lausanne

Photo de couverture : David Moreau

Impressum

Moreau D., Principi F., Ravalet E. (2021). Scénario de transition énergétique 2050, Secteur du bâtiment – surface, chauffage et climatisation, rapport technique. Mobil’homme Sàrl, Lausanne (Suisse)

Profil du mandataire

Mobil’homme est un bureau de sciences sociales actif dans l’urbain et la mobilité, basé à Lausanne (Suisse). Il a été fondé en 2015 comme *spin off* du Laboratoire de sociologie urbaine (LaSUR) de l’École polytechnique fédérale de Lausanne (EPFL). Le bureau Mobil’homme a la particularité de regrouper dans son équipe pluridisciplinaire des chercheurs relevant d’une grande diversité disciplinaire : sociologue, anthropologue, urbaniste, géographe, économiste, historien, ingénieur. Cette richesse de compétences lui permet d’articuler des dispositifs méthodologiques variés et hautement innovants, tout en croisant des compétences qualitatives et quantitatives, sur des projets d’envergure. Ses membres continuent par ailleurs d’exercer une activité scientifique de pointe. Ce positionnement unique, mettant des chercheurs en activité au service de la recherche appliquée et de l’expertise de haut niveau, fait du bureau Mobil’homme le point de passage clé entre le monde académique et les besoins des collectivités et des prestataires privés.

www.mobilhomme.ch / info@mobilhomme.ch

MOBIL’HOMME Sàrl.
Études, recherches, expertises
Avenue de Sévelin 28
CH-1004 Lausanne

Sommaire

1	INTRODUCTION.....	9
2	METHODOLOGIE.....	10
2.1	Surfaces.....	10
2.2	Chauffage.....	10
2.3	Climatisation, ventilation et gestion du bâtiment.....	11
3	FONCTIONNEMENT DU FICHIER EXCEL	12
3.1	Onglet input output principaux	12
3.2	Autres onglets.....	12
4	REVUE DE LITTERATURE.....	14
4.1	Surfaces.....	14
4.1.1	Surfaces résidentielles.....	14
4.1.2	Surface du secteur tertiaire	16
4.2	Chauffage.....	18
4.2.1	Température.....	18
4.2.2	Performance.....	19
4.3	Climatisation, ventilation.....	20
5	HYPOTHESES.....	22
5.1	Surfaces.....	22
5.2	Chauffage.....	23
5.3	Climatisation, ventilation et gestion du bâtiment.....	24
6	RESULTATS	25
6.1	Surfaces.....	25
6.2	Chauffage.....	26
6.3	Climatisation, ventilation et gestion du bâtiment.....	27
7	DISCUSSION	29
7.1	Surfaces.....	29
7.2	Chauffage.....	30
7.3	Climatisation, ventilation et gestion du bâtiment.....	32
8	CONCLUSION	33
9	REFERENCES	34

1 Introduction

Le secteur du bâtiment, obtenu en agrégeant l'énergie utilisées par les ménages et par le secteur tertiaire, représente plus de 40% du budget énergétique suisse (OFEN, 2020a). De manière générale, le chauffage des locaux est, avec 223 PJ en 2019, le poste de consommation le plus important du pays avec la mobilité intérieure (233 PJ). La climatisation et la ventilation, qui représentent actuellement que 23 PJ de manière globale (chiffres de l'OFEN, 2020a, en incluant les installations techniques), pourraient être amenées à augmenter dans les prochaines années sous l'impulsion du réchauffement climatique et de la démocratisation des climatiseurs électriques dans les ménages et bâtiments tertiaires. Ces deux besoins particulièrement conséquents sont directement liés aux surfaces de logements, travail et activités tertiaires qui doivent être refroidies ou réchauffées pour assurer un confort thermique en toute saison. Plusieurs types de mesures peuvent dès lors être imaginées pour permettre de réduire les impacts néfastes de ces consommations d'énergie sur l'environnement, et en particulier la réduction des émissions de gaz à effet de serre.

Tout d'abord, la réduction des besoins en chauffage par unité de surface dans le secteur des bâtiments semble indispensable à la réussite d'une stratégie énergétique. Des mesures d'assainissement des bâtiments existants et un programme de nouvelles constructions suivant des standards exigeants doivent être mis en place pour améliorer l'enveloppe thermique moyenne du parc immobilier et limiter ainsi au maximum les pertes de chaleur. Une utilisation de meilleures chaudières fonctionnant à partir d'énergies renouvelables lorsque c'est possible, notamment de pompes à chaleur, permet une amélioration conséquente des rendements globaux et participe à la réduction des besoins en énergies non-renouvelables. En ce qui concerne la climatisation, la conception des bâtiments et des appareils à basse consommation permettraient également de réduire les besoins.

En plus de ces mesures d'efficacité, le comportement des utilisateurs joue un rôle important pour atteindre les objectifs plus rapidement. Les bonnes habitudes de chauffage et de ventilation permettent d'économiser de l'énergie mais aussi de prévenir des problèmes de santé. Il est difficile d'estimer les économies d'énergie qu'il est possible de réaliser car il n'y a pas, au niveau européen, de données disponibles sur les pratiques de chauffage et de ventilation et que cette question est à considérer en tenant compte des différents climats (Bierwirth et al., 2019). Cependant, un meilleur réglage de la température interne lors des jours chauffés peut permettre une économie d'énergie significative. Cette adaptation peut se faire activement, en ajustant si besoin son habillement pour rester malgré tout dans une situation de confort thermique, ou alors passivement par un réglage automatique de la température. Pour la climatisation, des adaptations comportementales (aération nocturne, habillement adapté, etc.) permettent également de ne pas être dans l'obligation de climatiser les espaces.

Finalement, un indicateur particulièrement pertinent et directement lié à ces consommations est la surface de référence énergétique (SRE), soit toutes les surfaces de plancher incluses dans l'enveloppe thermique des bâtiments et dont l'utilisation nécessite un chauffage ou une climatisation. Lors de ces dernières années, les surfaces habitables par habitant n'ont pas cessé d'augmenter, passant de 34 m² en 1980 à 46 m² aujourd'hui, avec pour conséquence une augmentation directe des SRE et de l'énergie nécessaire pour le chauffage. En conséquence, il est possible de diminuer la consommation énergétique du secteur du bâtiment en mettant en place des mesures visant à stabiliser, voire à diminuer, les SRE par habitant.

Ce rapport présente les hypothèses d'évolution des performances énergétiques des bâtiments neufs et rénovés jusqu'en 2050, l'impact attendu de la sobriété en termes de réglage de la température interne mais aussi l'évolution possible des SRE sur la période selon deux scénarios : un tendanciel dans lequel peu de changements sont obtenus et un négaWatt où les hypothèses d'évolution de l'efficacité, de diffusion des énergies renouvelables et d'apparition de la sobriété énergétique permettent d'atteindre de meilleures performances environnementales.

2 Méthodologie

2.1 Surfaces

Dans le secteur résidentiel, l'évolution des surfaces se base sur une répartition des ménages par type de logement. En effet, dans le modèle, les logements sont différenciés selon le type de propriété (les habitants sont les propriétaires, des locataires ou le logement est une coopérative) et selon leur localisation (urbain ou rural). La SRE pour chaque pas de 5 ans entre 2015 et 2050 est ensuite calculée en se basant sur deux sets d'hypothèses principaux :

1. L'évolution de la part de chaque type de logement dans le parc global.
2. L'évolution de la surface par personne pour chaque type de logement

L'équation utilisée est donc :

$$SRE_{rés} = \sum_{i,j} Nmenages_i \cdot Taille_i \cdot Part_{i,j} \cdot (Shab_{i,j} + \Delta S)$$

Où i est la localisation d'un logement (urbain/rural) et j le type de propriété (propriétaire/locataire/coopératives) et :

$Nmenages_i$ est le nombre de ménages urbain/ruraux totaux en Suisse

$Taille_i$ est le nombre de personne par ménage urbain/rural

$Part_{i,j}$ est la part de chaque type de logement dans le parc global

$Shab_{i,j}$ est la surface habitable par personne, en m^2 , pour chaque type de logement

ΔS est la différence entre les SRE et les surfaces habitables. Dans le scénario négaWatt, les résidences secondaires chauffées constituent une partie de cette différence. La réduction de ΔS est donc expliquée par une diminution du chauffage des résidences secondaire, de vacances ou autres logements partiellement occupés pendant l'année.

Pour le secteur tertiaire, la modélisation se base simplement sur le nombre d'employés actifs et sur la surface moyenne par employé, ce qui donne :

$$SRE_{tertiaire} = Nemploi_{tertiaire} \cdot SRE_{emploi}$$

2.2 Chauffage

En ce qui concerne les besoins en chauffage, la consommation en énergie par unité de surface est séparée selon les bâtiments existants, rénovés et neufs, chacune de ces catégories étant divisées en deux niveaux de performance. Les besoins utiles en chaleurs des bâtiments existants sont déduits des statistiques énergétiques actuelles (OFEN, 2020a) en considérant une part de logements déjà aux normes et une part moins bonne. C'est cette seconde part qui est rénovée en priorité dans les prochaines années. En ce qui concerne les travaux de construction et rénovation, ils satisfont soit des valeurs limites minimales, soit un label énergétique plus poussé. Pour prendre en compte le surchauffage par rapport aux normes, les besoins par type de bâtiment sont ensuite majorés en fonction de la différence entre la température moyenne supposée et 20°C. Le nombre de degré-jours chauffés n'est pas pris en compte explicitement dans le calcul mais est pris comme un facteur permettant d'aider la réduction des besoins.

Puis, le nombre de bâtiments concernés par chaque catégorie de performance doit être déterminé en fixant le taux de rénovation des bâtiments existants et le taux de bâtiments rénovés et construits avec les meilleurs labels. La surface à construire est déterminée grâce au modèle d'évolution des surfaces de référence énergétique décrit à la section précédente. Il est à noter que la surface considérée est la

somme des surfaces résidentielles et tertiaires, ce qui suppose les même taux et performances dans les deux secteurs. L'énergie utile par catégorie est calculée en multipliant les besoins de chaque catégorie c (en kWh/m²) par la surface de cette catégorie, et l'énergie utile totale est la somme :

$$E_{utile} = \sum_c Besoin_c \cdot SRE_c$$

Déterminer la consommation d'énergie finale demande finalement deux autres sets d'hypothèses :

1. La part de chaque type de chauffage (pompes à chaleur, mazout, gaz, etc.), qui est définie pour sortir des énergies fossiles d'ici à 2050.
2. Le rendement de chaque type de chauffage.

Elle est ensuite calculée en répartissant l'énergie utile pour chaque système de chauffage s , comme suit :

$$E_{finale} = E_{utile} \cdot \sum_s \frac{Part_s}{\eta_s}$$

2.3 Climatisation, ventilation et gestion du bâtiment

Les besoins en énergie finale des surfaces ventilées dans les ménages et le taux de surface équipée sont repris des perspectives énergétiques de l'OFEN (2012), selon le scénario NPE pour négaWatt et le scénario au fil de l'eau pour les hypothèses tendanciellles. Vu que la ventilation mécanique est préférable à la climatisation, consomme peu d'énergie pour son fonctionnement et permet même d'en récupérer si l'installation est équipée correctement, aucune mesure de sobriété d'usage n'a été ajoutée.

En ce qui concerne la climatisation des ménages, les besoins sont également repris des perspectives de l'OFEN et découlent du nombre de jours « refroidis ». Ils augmentent donc avec le réchauffement climatique. Dans le scénario négaWatt, ces besoins sont diminués en considérant une température cible de refroidissement plus élevée. L'énergie finale est calculée en multipliant les besoins de refroidissement par surface par la part de la surface totale climatisée, puis en divisant par le rendement des climatiseurs.

Dans les statistiques et perspectives de l'OFEN, la climatisation et la ventilation sont souvent données avec d'autres besoins liés à la gestion des bâtiments. Il s'agit de l'énergie auxiliaire aux systèmes de chauffage, des antennes, de la mise en réseau des bâtiments et des humidificateurs. Ces besoins sont simplement repris des perspectives énergétiques de l'OFEN, selon les scénarios NPE ou tendanciels, et adaptés aux SRE, différentes dans le scénario négaWatt.

Pour ce qui est du secteur des services, l'estimation précise des besoins actuels est plus difficile car les rapports de l'OFEN (2020 ; 2012) ne donnent pas de détails sur la consommation des différents postes inclus dans « Klima, Lüftung und Haustechnik ». Dans le cadre de ce rapport, il est supposé que la consommation par unité de surface des différents services du bâtiment (énergie auxiliaire, antennes, mise en réseaux des bâtiments et humidificateurs) est la même que pour le résidentiel. Les valeurs de consommation globales sont donc obtenues en adaptant ceux des ménages à la surface du tertiaire. Les valeurs obtenues sont ensuite soustraites aux besoins exposés dans le scénario NPE de l'OFEN pour connaître la consommation d'énergie attribuée à la ventilation et à la climatisation. Comme dans le résidentiel, ces besoins, modélisés ensemble pour le tertiaire, sont déterminée par le nombre de jours refroidis, le rendement des technologies et la part de surface équipée dans un premier temps. Dans le scénario négaWatt, ils sont en plus réduits en fonction d'une température de refroidissement considérée plus haute que dans le scénario tendanciel.

3 Fonctionnement du fichier Excel

3.1 Onglet input output principaux

Comme pour les autres modèles, l'onglet input-output permet de faire varier les principaux indicateurs avec une visualisation des résultats. Il est constitué de sept zones représentées par la Figure 1.

1. **Input** : les valeurs qui s'y trouvent sont directement utilisées dans la modélisation.
2. **Suggestion d'input négaWatt** : une proposition d'un jeu de données, correspondant au scénario négaWatt, qui peut être entrée dans le modèle par un copier-coller dans la zone 1.
3. **Suggestion d'input tendanciel** : une proposition d'un jeu de données, correspondant au scénario tendanciel, qui peut être entrée dans le modèle par un copier-coller dans la zone 1.
4. **Output** : les valeurs qui s'y trouvent sont les résultats de la modélisation selon les données présentes dans la zone 1.
5. **Output négaWatt** : les résultats de la modélisation selon les données présentes dans la zone 2.
6. **Output tendanciel** : les résultats de la modélisation selon les données présentes dans la zone 3.
7. **Données informatives** : les données présentes sont proposées à titre informatif. Il peut s'agir de statistiques nationales ou de résultats d'autres modélisations. Cette zone n'est pas systématiquement présente dans les fichiers Excel.

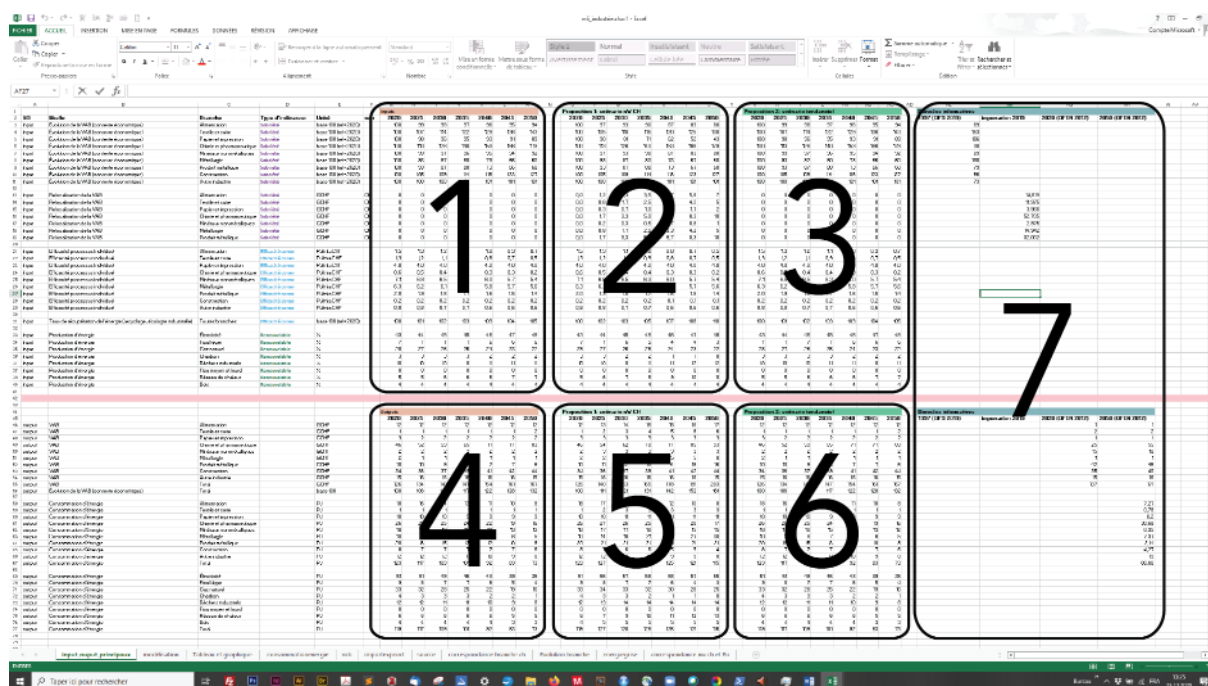


Figure 1 Onglet Input_output principaux constitué de 7 zones permettant de faire varier les principaux indicateurs de la modélisation négaWatt (provenant du modèle « industrie »)

3.2 Autres onglets

En plus de l'onglet principal commun à tous les micro-modèles, le fichier Excel des surfaces, chauffage et refroidissement comprend les onglets suivants :

- **Input_secondaires** : construit de la même manière que l'onglet « inputs_outputs_principaux » mais présente des indicateurs moins importants du scénario négaWatt, pour permettre plus de clarté dans le premier onglet.
- **Impact_nW** : cet onglet met en avant l'impact de chacun des piliers de l'approche négaWatt (sobriété, efficacité et énergies renouvelables). Il regroupe également des données utiles pour les différentes figures utilisées dans ce rapport.
- **Population_ménage** : présente la séparation de la population entre les zones urbaines et rurales, et estime le nombre de personne par ménage dans chaque zone.
- **Surface, chauffage et Clim_ventil_gestion**: les calculs sont faits dans ces onglets. Les valeurs d'entrée sont celle de la zone 1 sur la Figure 1 et les résultats sont ensuite affichés dans la zone 4 de la Figure 1.
- **Sources** : les sources utiles à la modélisation et à la définition des hypothèses utilisées dans ce fichier Excel sont présentées dans cet onglet.

4 Revue de littérature

4.1 Surfaces

4.1.1 Surfaces résidentielles

Les logements suisses font partie des plus grands d'Europe, avec une forte différence de surface entre les logements urbains, suburbains et ruraux (European Commission, 2019). Lors de ces dernières années, les surfaces habitables et les SRE par habitant n'ont pas cessé d'augmenter, passant respectivement de 39 m² en 1990 à 46 m² aujourd'hui et de 52 m² à 60 m² (OFEV, 2019, 2020).

L'augmentation de la taille des logements est liée à de multiples facteurs socio-économiques, tels que la taille et la composition des ménages, le revenu, le vieillissement de la population, l'augmentation de la surface des logements construits et un effet de « empty nest » (les ménages âgés restent dans leur logement initial pendant des années). Elle est aussi influencée par la conception des logements : comment sont-ils pensés pour être réaménagés et adaptés aux besoins du moment ou pour être partagés entre différents utilisateurs ? Les évolutions ou les ruptures familiales (séparations, arrivées ou départs des enfants, etc.) modifient les besoins en surface et peuvent imposer un déménagement difficile ou au contraire inciter à rester dans un logement inadapté, indépendamment des conditions de revenus notamment (Bierwirth & Thomas, 2019).

A l'inverse, on trouve aussi des facteurs allant dans le sens d'une diminution de la surface des bâtiments, comme les restrictions financières poussant à déménager vers un logement plus petit ou les mesures de lutte contre l'isolement social. Dans le même sens, le marché tendu de l'immobilier incite certaines villes à mettre en place des projets de logements communautaires ou de micro-logements qui permettent d'optimiser la surface par habitant en développant des espaces mutualisés, tels que buanderies, chambres d'amis, pièces de jeux, bureaux, etc. (Bierwirth & Thomas, 2019). Ce type de logements est fortement représenté dans les coopératives de logements, notamment en ville de Zürich, où les différentes crises économiques et la pression sur le marché de l'immobilier ont mené lors du dernier siècle à un fort développement de ce mode de propriété qui représentait en 2015 26,8 % des logements de la ville (Peltier, 2019; Rey, 2016).

En parallèle, l'étude détaillée menée par l'Office Fédéral du Logement (OFL, 2017) sur des données de 2014 montre une forte disparité de la surface habitable par habitant entre les coopératives de logements, le secteur locatif conventionnel et les logements en propriété, avec une différence marquée entre les espaces ruraux et urbains, comme illustré par la Figure 2. **Erreur ! Source du renvoi introuvable..** L'augmentation constatée est également différente selon la catégorie de logement.

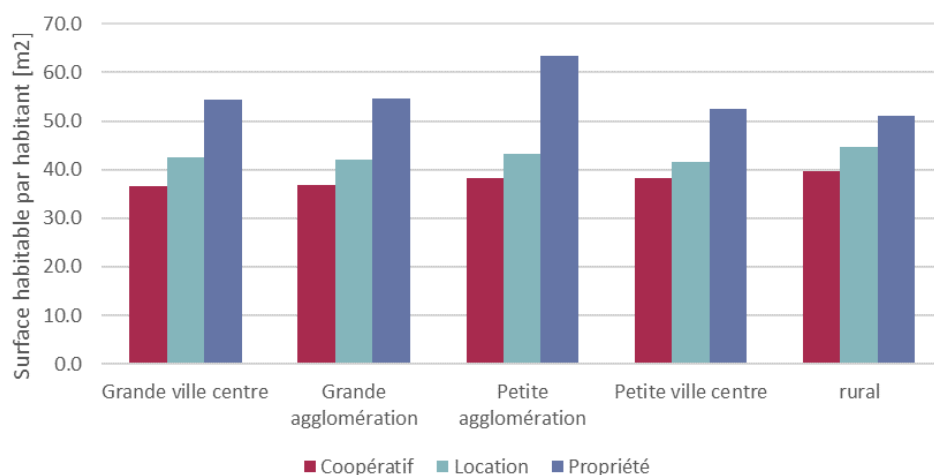


Figure 2 Surface habitable par habitant selon le type de logement et sa localisation. Ces valeurs ont été déterminées par croisement des informations disponibles dans le document « Le point sur le logement d'utilité publique. Une comparaison avec le locatif et la propriété » (OFL, 2017)

Le rapport de l'OFL (2017) montre aussi la répartition des logements entre ces différents modes de « propriété », avec sur l'ensemble de la Suisse une forte présence des logements en location.

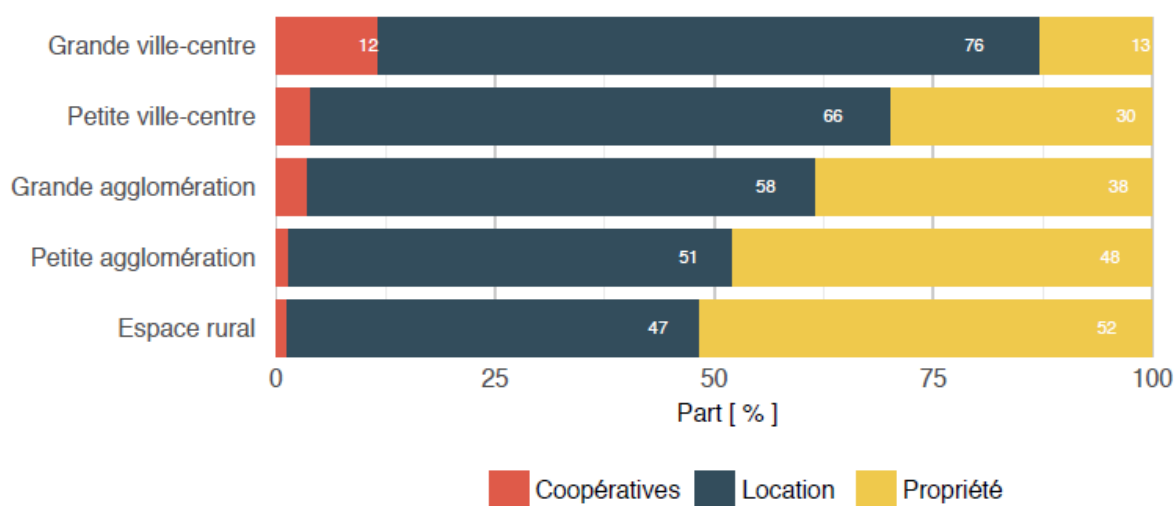


Figure 3 : Part des différents logements selon le type d'agglomération (OFL 2017)

En termes d'évolution des modes de vie, précisons qu'une augmentation des colocations est prise en compte par statvd (2018) dans son étude prospective des logements à l'horizon 2040, en appuyant cette hypothèse sur une augmentation du prix des loyers qui progresserait plus rapidement que les revenus. Dans le même sens, une enquête en Allemagne portant sur la perception de l'espace du logement a permis de mettre en avant que 10 % des personnes pensent que leur appartement est trop grand. Ce sont des personnes habitant dans un appartement d'environ 78m². Ils sont généralement propriétaires de leur logement et 54% sont âgés de plus de 60 ans. 5% de ces personnes seraient heureuses d'habiter dans un logement plus petit et 34% pourraient, sous certaines conditions (notamment ne pas quitter le quartier actuel et ne pas avoir une augmentation de loyer), habiter dans un logement plus petit (Thomas et al., 2017). En Suisse, une part similaire de 10% a été évaluée dans une étude de l'OFL (Delbiaggio & Wanzenried, 2016).

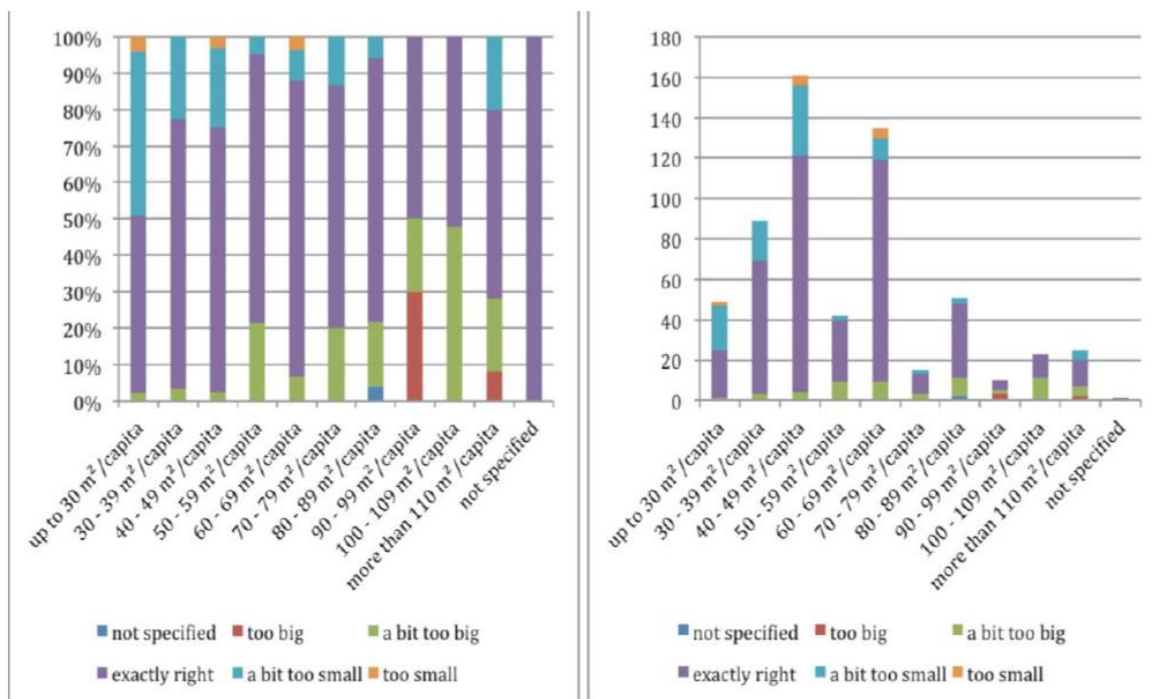


Figure 4 Enquête portant sur la perception de la taille du logement. Comment les personnes interrogées évaluent-elles leur appartement en fonction de leur taille par rapport à leur espace de vie par habitant ? Sondage réalisé auprès de 601 personnes (Thomas et al., 2017).

Enfin, il est important de préciser que la population suisse va, selon le scénario A de l'OFS (2015) repris par l'OFEN (2020), passer de 8,3 millions en 2015 à 10,3 millions en 2050, avec une évolution du nombre de ménage de 3,7 millions à 4,6 millions, soit des ménages de respectivement 2,25 et 2,14 habitants (OFS, 2017). En ce qui concerne la répartition géographique, la population suisse est à 79% urbaine (OFL, 2017).

4.1.2 Surface du secteur tertiaire

Dans le secteur tertiaire, les SRE par emploi ont fortement diminué pour passer de 48 m² au milieu des années 90, à 41 m² aujourd'hui. Cela traduit un souci de rentabilité des entreprises qui souhaitent optimiser l'utilisation de l'espace (Bernet, 2017). Un second aspect à mettre en évidence est la prolifération des open spaces qui permettent un gain de place de 10 à 30% (SECO, 2016). Au niveau socio-culturel, de nouvelles formes de travail émergent ; le télétravail devient courant (SECO, 2016) et le desk sharing prend ainsi de plus en plus de place. Ceci permettrait d'économiser 20% de la surface nécessaire (Bernet, 2017; Konkol et al., 2017). De même, une tendance à la disparition des bureaux fait son chemin, les entreprises louent des bureaux selon leurs besoins du moment, ce qui contribue également à réduire la surface par employé (Bernet, 2017).

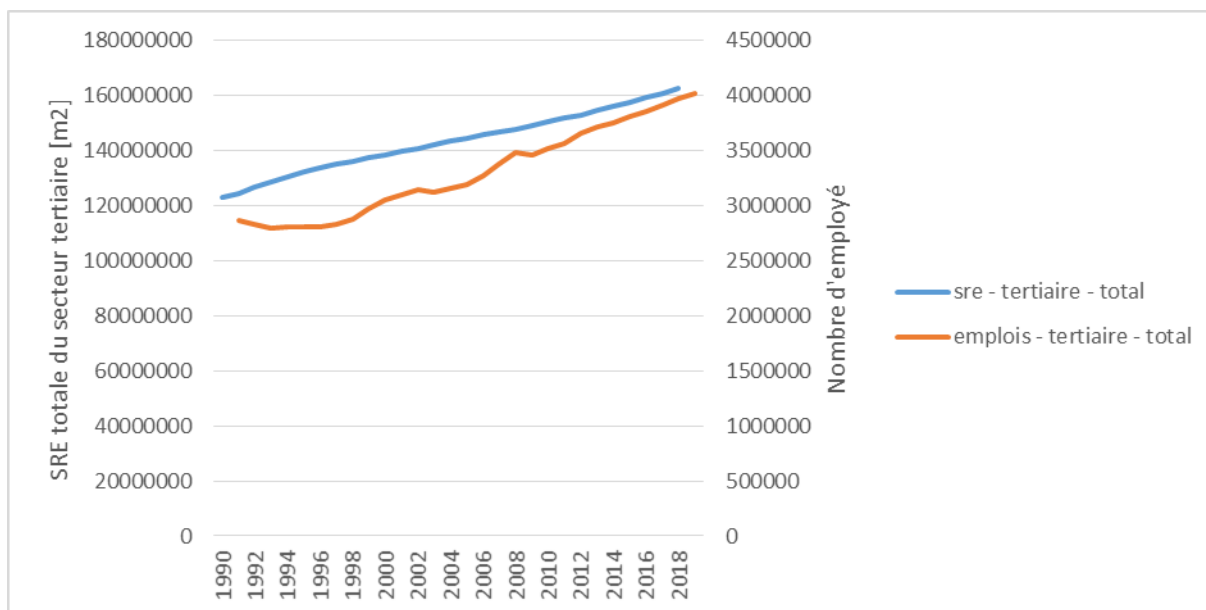


Figure 5 Évolution des SRE et du nombre d'employé du secteur tertiaire en Suisse (OFEV, 2019, 2020).

Cette économie de surface par employé dans le secteur tertiaire est à pondérer par deux questions :

- La qualité de l'environnement de travail en termes de surface suffisante à disposition par employée est-elle préservée ?
- Le gain de place dans les entreprises par des pratiques du type télétravail n'est-il pas une simple délocalisation des bureaux chez les employés ou dans des espaces de co-working, annulant ainsi l'économie globale de surface ?

En ce qui concerne la qualité de l'environnement de travail, il existe 7 facteurs de satisfactions, dont le confort spatial et la privacité (Fleury-Bahi & Marcouyeux, 2017), deux critères portant sur l'agencement de l'espace. En ce sens, Danielsson & Bodin (2009) s'intéressent aux différents types d'organisation de bureaux existants ainsi qu'à leurs impacts sur la satisfaction des employés. 4 agencements sont identifiés ; les bureaux individuels, les bureaux partagés (2-3 personnes), les open spaces (où chacun dispose d'un poste fixe) et les flex offices (sans poste fixe).

Selon Moissonnier (2018), les open spaces, les flex offices et espaces de travail alternatifs sont minoritaires dans les entreprises, la majorité des employés préférant des bureaux fermés et individuels. Néanmoins, les salles de repos/détente commencent à prendre de l'ampleur puisqu'elles sont utilisées à 71% par les employés y ayant accès. Le nomadisme augmente en lien avec la multiplication des lieux et environnement de travail nouveaux tels que les transports en commun, les espaces voyageurs ou les bibliothèques publiques. De même, les espaces de co-working, fablabs et incubateurs d'innovations se démocratisent avec ¼ des actifs français qui font usage de ces espaces. Finalement, les bureaux sans postes fixes sont également de plus en plus appréciés. La tendance globale va donc vers des bureaux fermés mais sans postes fixes, avec une plus grande flexibilité dans l'organisation du travail. Ainsi, l'optimisation de l'aménagement des espaces de travail est un facteur de satisfaction, de motivation et de productivité des employés. Les aspects normatifs et réglementaires parlent d'un minimum de 10m² par employé comprenant l'accès, l'espace de mouvement nécessaire au déroulement du travail et les espaces destinés aux appareils de travail et au mobilier, ainsi qu'à leur entretien (Bernet, 2017).

Au sujet du télétravail, il permet effectivement un gain de place (Économie Suisse, 2012) mais cela ne signifie pas pour autant qu'il s'agit d'un remède contre l'éparpillement (Fernandez, 2016). En effet, le télétravail ne se résume plus à du travail à domicile : le travailleur devient nomade et multiplie ses espaces de travail. Train, bibliothèque, ou encore espace de co-working sont des exemples de ces

nouveaux lieux. Ainsi, il y a là un potentiel effet rebond avec une augmentation de ces nouveaux espaces de travail (Fernandez, 2016).

4.2 Chauffage

4.2.1 Température

Les normes de consommation énergétiques pour le chauffage des bâtiments se basent habituellement sur une température intérieure de 20°C, rarement atteinte dans la pratique. Dans une étude du parc genevois, il a par exemple été constaté que la température moyenne dans les logements est plutôt proche de 22-23°C (Khoury, 2014). La température interne du logement étant une variable déterminante dans les besoins en énergie et pouvant être influencée par des mesures de sobriété, il est important de l'étudier plus en détail dans le cadre de la modélisation négaWatt.

La notion de confort thermique est déterminante dans le choix de la température intérieure. Chaque individu a une sensibilité différente et les caractéristiques du bâtiment (ventilation naturelle, matériaux utilisés, humidité, etc.) peuvent influencer le ressenti, mais une certaine adaptation des habitants est possible en jouant sur l'habillement. Si l'environnement n'est pas thermiquement régulé, les conditions de confort considérées comme acceptables sont souples et sont directement liées à la température extérieure. Des mesures faites dans de nombreux bâtiments situés dans le monde entier montrent que quand les bâtiments ne sont ni chauffés ni refroidis, la grande majorité des occupants est satisfaite du confort thermique tant que la température opérative, qui peut être définie comme la moyenne entre la température de l'air et la température des parois quand le flux d'air est faible, reste entre les limites montrées sur la Figure 9 :

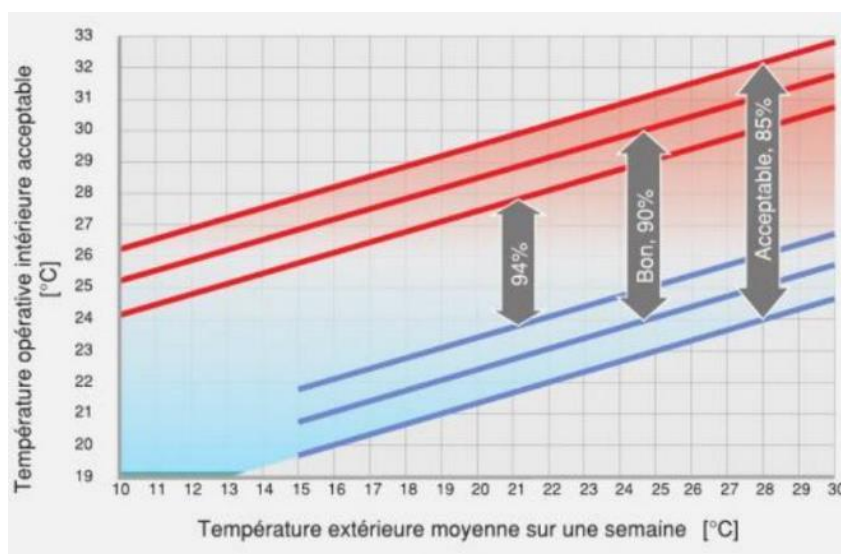


Figure 9 : Gamme des températures acceptables dans un bâtiment non régulé thermiquement (d'après EN 15251). Les chiffres dans les flèches indiquent le pourcentage de personnes satisfaites tant que la température reste à l'intérieur des limites correspondantes.

La température idéale se situe entre 23 et 26°C en été et entre 19 et 24°C en hiver (Roulet, 2012). Du point de vue de la sobriété, des facteurs comme la sensibilité au froid, au chaud ou l'activité ne sont pas modifiables. Il est en revanche possible d'augmenter par diverses mesures la plage de tolérance. En saison chaude, chacun peut adapter son habillement, prendre des boissons froides ou provoquer un courant d'air par des fenêtres ouvertes ou à l'aide d'un ventilateur qui permet d'augmenter les échanges de chaleur. De même, en saison froide, il est possible de s'habiller afin de compenser les températures plus basses.

La rénovation énergétique des bâtiments peut permettre d'augmenter la température des parois et ainsi diminuer la différence avec la température de l'air intérieur, diminuant également l'inconfort. Cependant, et comme mentionné plus haut, le potentiel d'économie d'énergie après rénovation est souvent inférieur au potentiel théorique à cause d'une température trop élevée dans le logement par rapport aux valeurs normées (Khoury, 2014). Il est souvent supposé que chaque degré induit une différence de 6% dans l'énergie dépensée pour le chauffage (Jorio, 2018). Cependant, il semblerait que cette valeur sous-estime les économies de chauffage potentielles, surtout lorsque les performances énergétiques sont bonnes (Lenormand, 2018). Cette augmentation des besoins par degré de chauffage supplémentaire atteint par exemple 11% dans un échantillon d'immeubles rénovés ayant une température intérieure moyenne de 23°C, et semble encore plus importante pour les meilleures bâtiments (Khoury et al., 2017).

Une température trop basse n'est pas non plus souhaitable. D'ailleurs, d'un point de vue légal, en Suisse, la jurisprudence considère un bâtiment comme insuffisamment chauffé en dessous de 18°C. Un locataire vivant dans un tel appartement pourrait demander une réduction de loyer à son bailleur (Bon à Savoir, 2011 ; ASLOCA, 2016).

Dans une étude sur les pratiques sociales de ménages, un bon nombre de participants étaient au courant que le chauffage des espaces intérieurs consomme de l'énergie et pose des problèmes en termes de changement climatique, mais peu avaient une vraie connaissance des meilleures pratiques à mettre en place pour réduire leur impact. Après une phase de test d'une température plus basse dans leur logement, les participants ont considéré pouvoir se sentir en confort thermique à une température plus basse que ce qu'ils auraient pensé. Une réduction pour atteindre 20°C semble possible au vu des résultats de ce défi, surtout que les participants ont gardé une température plus basse après la fin de l'expérience. L'approche par l'expérimentation semble donc prometteuse (Godin et al., 2019).

4.2.2 Performance

D'un point de vue plus technique, la performance énergétique des bâtiments, exprimées en besoins de chaleur annuelle par unité de surface [kWh/m²], est l'un des indicateurs les plus importants du modèle étant donné son impact significatif sur la consommation énergétique totale. En Suisse, les besoins en chauffage sont déterminés selon le modèle de prescriptions énergétiques des cantons (EnDK, 2018). Les besoins en chaleur pour plusieurs catégories de bâtiments neufs y sont exprimés selon des valeurs limites par type de bâtiment : 13 et 15 kWh/m² pour les bâtiments collectifs, 16 et 15 kWh/m² pour des habitats individuels avec une température annuelle moyenne de 19.4°C. Les valeurs limites des bâtiments rénovés sont obtenues en multipliant par 1.5 celles des nouvelles constructions (EnDK, 2018).

Il existe également des labels énergétiques, plus ambitieux que les valeurs limites de construction ou rénovation. Les perspectives énergétiques de la confédération se basent par exemple sur le label « Passivhaus », qui considère des besoins annuels en chaleur de 15 kWh/m². Dans son scénario NPE, l'OFEN prévoit que les nouvelles constructions atteignent globalement ce label en 2030 déjà, et même dès 2020 pour les immeubles collectifs. En ce qui concerne les rénovations, les immeubles collectifs arrivent à atteindre ces performances en 2035, tandis que les maisons individuelles restent légèrement au-dessus sur toute la période considérée (OFEN, 2012). Il est en effet plus difficile de réduire considérablement les besoins pour les rénovations. C'est pourquoi il existe un standard de certification (EnerPhit) reprenant les exigences des maisons passives tout en étant plus souple quant aux besoins en chaleur, qui peuvent monter jusqu'à 25 kWh/m² (La Maison Passive, 2020). La variante NPE de l'OFEN (2012) prévoit une augmentation significative du taux d'assainissement des bâtiments, qui double pour s'établir à près de 1.9% par an. Combinés à de nouvelles constructions très peu gourmandes en énergie, ces assainissements permettent de réduire la demande en chaleur par surface du parc immobilier global qui passe de 93.8 kWh/m² en 2010 à 21.1 kWh/m² en 2050, soit une

réduction de 77,5%. Cependant, l'augmentation des besoins en surface limite ces gains au niveau du parc de logements (OFEN, 2012).

Pour comparaison, dans le scénario négaWatt France, la performance énergétique des bâtiments neufs (immeubles collectifs et maisons individuelles) est estimée à 15 kWh/m²/an dès 2010 (constante jusqu'en 2050). 76% des maisons individuelles et 95% des bâtiments collectifs seront rénovés en 2050, avec des performances énergétiques de chauffage après rénovation de respectivement 45 kWh/m²/an et 40 kWh/m²/an (négaWatt, 2018).

4.3 Climatisation, ventilation

La qualité de l'isolation des bâtiments et leur étanchéité à l'air deviennent très performantes après rénovation ou dans les nouveaux bâtiments, ce qui permet de réduire considérablement les dépenses d'énergie pour le chauffage. Cependant, l'air intérieur ne s'y renouvelle donc presque plus naturellement, ce qui peut poser certains problèmes, par exemple en ce qui concerne la concentration de CO₂, d'humidité ou simplement de confort thermique pour les occupants. La ventilation des espaces devient par conséquent un enjeu majeur des bâtiments à hautes performances énergétiques (SuisseEnergie, 2014).

Selon ce rapport de SuisseEnergie (2014), les aspects architecturaux et comportementaux pourraient être plus souvent considérés, en plus des solutions techniques de ventilation mécanique. Il existe par exemple plusieurs exemples d'architectures vernaculaires (région alpines, maisons égyptiennes, etc.) jouant sur la disposition des pièces ou sur des ouvertures murales pour obtenir un confort thermique intérieur. De plus, le bien-être des habitants passe également par des facteurs subjectifs, tel que le fait d'ouvrir la fenêtre et faire pénétrer la lumière, le bruit et l'air extérieur. Alors que pour les nouveaux bâtiments, il est possible d'intégrer directement les systèmes de ventilation dans la conception, les contraintes constructives ou spatiales compliquent significativement la mise en place de nouveaux éléments lors de rénovations. Il est cependant nécessaire d'examiner les solutions qui ne sont pas purement techniques et qui, dans certains cas, ne demandent pas ou peu d'apport en énergie. L'exploitation combinée d'éléments spatiaux et d'appareils mécaniques décentralisés peuvent apporter des solutions adaptées à la situation particulière. En parallèle, le développement de nouveaux matériaux de construction, perméables à l'air mais sans perte d'énergie, pourrait assurer un renouvellement de l'air sans apport d'énergie supplémentaires.

En termes de sensation de confort, une gestion plus libre par les occupants du logement peut être envisagée, notamment par une ventilation par les fenêtres. Cependant, pour éviter de ruiner les efforts mis dans la réduction des pertes thermiques, il faut s'assurer que les règles à respecter soient connues des habitants et en appeler à leur responsabilité (SuisseEnergie, 2014). Il est cependant presque impossible de garantir une qualité de l'air suffisante tout en évitant les pertes thermiques avec une ventilation manuelle par les fenêtres. Elle peut cependant bien compléter un système mécanique de ventilation de confort, où la chaleur de l'air vicié passe par un récupérateur de chaleur, ce qui peut permettre de réduire les pertes de chaleur de 80%. La consommation d'électricité est 7 à 10 fois inférieure à l'énergie thermique économisée. Il est donc très intéressant de poser ce type d'installation quand elle est adaptée (Minergie, 2020 ; Huber, 2010).

En revanche, l'air conditionnée représente une potentielle consommation électrique supplémentaire, tant dans le secteur résidentiel que tertiaire. Le réchauffement climatique en cours devrait augmenter les besoins en climatiseurs, dans les bâtiments. En effet, la sensation de chaleur peut avoir un impact considérable sur la qualité du travail. Dans les bureaux, les climatiseurs, faciles à installer et relativement bon marché, sont à la mode. Cependant, leur efficacité de refroidissement n'est pas optimale, et leur consommation d'énergie est conséquente ; de meilleures solutions peuvent être considérées. La brochure « Rester Cool » de SuisseEnergie, présente certaines de ces méthodes peu gourmandes en énergie (SuisseEnergie, 2019).

Tout d'abord, des protections solaires, par des stores ou des volets roulants, doivent être mises en place dès le matin. En effet, une fois la pièce chauffée, il est difficile de faire descendre la température. Si les pièces ne sont pas équipées d'installations de protection adéquates, l'investissement en vaut la peine.

Une deuxième mesure préventive peut être la mise en place d'un plan d'aération dans l'équipe de travail au bureau. Un système automatique permet la planification et la simplification de la mesure. L'aération est plus efficace le matin à l'aube et peut également être réalisée la nuit. Lors de l'utilisation d'un climatiseur, la température cible est également importante. La température optimale de travail est située entre 22°C et 26°C lors de la saison chaude, climatiser pour atteindre une température moindre est inutile.

De plus, il est possible d'éteindre les appareils produisant de la chaleur. En effet, tous les appareils électriques, en particulier les ordinateurs, produisent de la chaleur lorsqu'ils fonctionnent, ce qui contribue à réchauffer la pièce. Si possible, les imprimantes et les routeurs devraient être placés dans une pièce à part.

Ensuite, les comportements peuvent être adaptés. Un changement du rythme de travail peut être considéré, en privilégiant le début et la fin de journée. Le télétravail, pourrait également être une option si l'environnement de la maison est plus frais qu'au bureau. Le fait de boire beaucoup, de manger léger ou de décontracter le style vestimentaire peut également permettre d'améliorer le confort thermique des employés. Finalement, l'utilisation de ventilateurs permet d'améliorer le confort thermique grâce aux courants d'air créés. Ces appareils consomment bien moins d'énergie que les climatiseurs.

Cependant, pour que des méthodes d'aération douce puissent fonctionner, il faut également que les conditions extérieures le permettent. Une bonne qualité de l'air nocturne est une condition nécessaire, qui pourrait être atteinte grâce à des mesures de restriction ou de ralentissement du trafic. La planification du quartier doit également favoriser l'ombre et la circulation de l'air entre les bâtiments (Pagliano et Erba, 2019).

En ce qui concerne l'efficacité, chaque degré de climatisation en moins permet de gagner 3% de besoins en énergie par unité de surface (SuisseEnergie, 2015). Toulouse et Attali (2018) vont même jusqu'à un gain de 5% par degré, même s'il s'agit d'une approximation grossière dépendant de plusieurs paramètres. Les auteurs pointent également le fait que beaucoup de surfaces tertiaires gardent la même température cible toute l'année, basée sur de vieux standards - hommes en costumes - et donc inadaptés à la situation réelle.

Finalement, au sujet des surfaces climatisées et ventilées, les perspectives énergétiques de l'OFEN (2012) et le scénario négaWatt France (2017) donnent des estimations intéressantes. 37.5% de la surface résidentielle sera climatisée en 2050 suivant le scénario NPE de la confédération (soit 226.1 millions de m² SRE, contre 6.2 millions en 2010). Les besoins par unité de surface augmentent selon les degré-jours de refroidissement et atteignent 30 kWh/m².an en 2050. Dans le scénario négaWatt français, au contraire, ces besoins n'augmentent pas, passant de 11.8 kWh/m².an en 2010 à 10 kWh/m².an en 2050. La part de surface climatisée est aussi plus faible en 2050, atteignant seulement 20%.

La ventilation de confort mécanique, qui inclut des installations de récupération de chaleur, va aussi considérablement se développer dans le scénario NPE de l'OFEN. En effet, avec l'amélioration de l'enveloppe thermique des bâtiments, des systèmes de renouvellement de l'air efficaces sont nécessaires pour assurer la qualité de l'air interne. La surface équipée passe de 14.2 à 191.9 millions de m² SRE entre 2010 et 2050.

5 Hypothèses

Pour tous les indicateurs, deux scénarios sont proposés, l'un négaWatt et l'autre tendanciel, afin de pouvoir mettre en avant l'impact des trois piliers de la démarche négaWatt. Les hypothèses sont posées à partir de la revue de littérature qui précède.

5.1 Surfaces

Comme expliqué dans la section précédente, les logements mutualisés permettent un gain d'espace par habitant en comparaison aux logements individuels. En parallèle, les logements urbains présentent une surface par habitant moindre que les logements ruraux et une augmentation totale de la population suisse est prévue, dont une part de plus en plus importante dans les zones urbaines.

Dans la suite de ce rapport, les logements coopératifs sont considérés comme mutualisés, ce qui explique leur surface par habitant plus faible que les autres formes de propriété. Afin de diminuer les SRE par habitant, le scénario négaWatt se base sur les hypothèses principales suivantes :

- Une politique en faveur des logements coopératifs est mise en œuvre, avec pour objectif 25% de ce type de logements dans les espaces urbains en 2050 et 10% dans les espaces ruraux. Pour comparaison, Zürich vise 30% à l'horizon 2030 et est à 20% aujourd'hui.
- L'augmentation des surfaces par personne dans chaque type de logement se ralentit par rapport au rythme actuel. Elle est deux fois moins importante en milieu rural et quatre fois moins importante en milieu urbain.
- Les résidences secondaires ne sont plus chauffées quand elles sont inoccupées. Cette réduction s'exprime dans le modèle par une diminution de moitié de ΔS .

Dans le secteur tertiaire, pour ne pas compromettre la qualité de l'environnement de travail, les surfaces employés sont maintenues au niveau actuel et ce dans les deux scénarios.

Indicateurs			2015	2050 tendanciel	2050 nW
Part des logements	Urbains	Coopératives	0,05	0,05	0,25
		En location	0,66	0,66	0,52
		En propriété	0,29	0,29	0,23
	Ruraux	Coopératives	0,01	0,01	0,10
		En location	0,52	0,52	0,48
		En propriété	0,47	0,47	0,42
Surface habitable par personne [m²]	Urbains	Coopératives	37	38	37
		En location	42	49	44
		En propriété	57	66	59
	Ruraux	Coopératives	40	41	40
		En location	45	52	48
		En propriété	51	60	56
Différence entre surfaces habitable et SRE par habitant [m²]			13	13	6
Surface par emploi dans le tertiaire [m²]			40,8	40,8	40,8

Tableau 1 : Principales hypothèses de modélisation des surfaces de logements.

5.2 Chauffage

La modélisation part de l'hypothèse que la température intérieure en période de chauffage est en 2015 de 2°C supérieure à la valeur normée de 20°C. Le scénario négaWatt considère que cet écart se réduit progressivement et s'annule en 2050, où la température intérieure effective atteint bien 20°C. En termes d'impact sur les performances de chauffage, chaque degré majore les besoins en chaleur de 6% pour les bâtiments de mauvaise qualité thermique, 11% pour les bâtiments neufs ou rénovés et 15% pour les meilleurs bâtiments (ceux qui ont une performance énergétique de 15 kWh/m²). Le taux de rénovation est plus fort dans le scénario négaWatt et atteint 2%, alors qu'il n'est que de 1.5% actuellement.

Pour chaque classe de bâtiments, une seule valeur de besoins a été considérée, sans différencier les maisons individuelles des bâtiments collectifs. Les bâtiments les moins bons thermiquement sont rénovés en premiers, ce qui fait baisser les besoins moyens du parc de bâtiments existants non rénovés. Finalement, il est considéré que les mêmes hypothèses de rénovations et de températures intérieures peuvent s'appliquer dans le tertiaire et dans les ménages. Le Tableau 2 présente l'évolution des performances énergétiques prises pour le scénario négaWatt par types de rénovations (valeurs pour une température de 20°C) ainsi que les autres hypothèses influençant les besoins en énergie utile. Les valeurs majorées et utilisées dans le modèle sont présentées dans la partie résultats.

A noter que la réduction du nombre de jour chauffés, induite par le réchauffement climatique à venir, n'est pas pris directement en compte dans ces hypothèses. Il est en effet considéré qu'il s'agit d'une facteur extérieur aidant à la diminution des besoins annuels.

Performance énergétique	2015	2020	2025	2030	2035	2040	2045	2050
Température de chauffage [°C]	22	22	21.7	21.3	21.0	20.7	20.3	20
Rénovations Passivhaus [kWh/m2]	25	25	25	25	25	25	25	25
Rénovations normales [kWh/m2]	56	56	56	56	56	56	56	56
Nouveaux bâtiments Passivhaus [kWh/m2]	15	15	15	15	15	15	15	15
Nouveaux bâtiments normaux [kWh/m2]	37	37	37	37	37	37	37	37
Taux de rénovation [%]	n.a.	1.5	1.7	2.00	2.00	2.00	2.00	2.00
Taux de rénovation et constructions au meilleur label [%]	0.0	10	50	100	100	100	100	100

Tableau 2 Performances énergétiques moyennes des bâtiments existants non-rénovés, des rénovations et des nouveaux bâtiments dans le scénario négaWatt, en kWh par m².an.

Les répartitions des systèmes de chauffage en 2015 et 2020 sont reprises et déduites des statistiques de l'OFEN (2020a). Les valeurs tendanciennes 2025-2050 sont fixées pour correspondre au mieux aux résultats publiés des perspectives de l'OFEN 2050+ (OFEN, 2020b). Peu de détails sont donnés sur la répartition exacte, mais la sortie complète du gaz et du mazout, ainsi que l'augmentation conséquente du nombre de pompes à chaleur et de réseaux de chaleur sont des hypothèses claires du scénario. Quant à l'efficacité, les scénarios et statistiques de la Confédération (OFEN, 2012 et 2020a) ne donnent explicitement qu'un rendement global pour le parc entier. L'évolution des rendements des différentes technologies a donc été partiellement basée sur des résultats de l'ADEME (2013 et 2015).

Système de chauffage [% de la surface]	2015	2050 nW	2050 tendanciel
Électricité (directe)	5	0.5	1.5
Mazout	41.2	0	16.2
Gaz	24.5	0	26.7
Chaleur à distance	5	25	8.9
Biomasse	8.7	10	10.6
Pompes à chaleur	14.9	60.9	34.9
Solaire thermique	0.4	3.6	1.1

Tableau 3 : Répartition des sources d'énergie pour les chaudières.

Système de chauffage – rendement [%]	2015	2050 nW	2050 tendanciel
Électricité (directe)	98	98	98
Mazout	87	90	88
Gaz	91	96	93
Chaleur à distance	100	100	100
Biomasse	84	90	88
Pompes à chaleur	330	510	400
Solaire thermique	100	100	100

Tableau 4 : Efficacité des différents types de chaudières

5.3 Climatisation, ventilation et gestion du bâtiment

Le nombre de degré-jours de refroidissement, qui augmente à cause du réchauffement climatique, provient des hypothèses de l'OFEN 2012, tout comme l'évolution de l'énergie finale par surface ventilée. La température de refroidissement est donnée en termes relatifs par rapport à la situation de 2015-2020. Elle est inchangée dans le scénario tendanciel, et augmente de 2 degrés dans le scénario négaWatt. Chaque degré permet une économie de 5%, comme supposé par Toulouse et Attali (2018). Ces hypothèses de température sont similaires pour les secteurs résidentiels et tertiaires.

Il a été supposé que les climatiseurs fonctionnent uniquement à l'électricité, avec un rendement suivant les prévisions de négaWatt France (2017). Les parts de surfaces tertiaires et résidentielles ventilées et climatisées sont inspirées des différents scénarios des perspectives de l'OFEN, ainsi que des hypothèses du scénario négaWatt français.

Finalement, les hypothèses de gestions du bâtiment sont directement reprises en énergie finale des scénarios de l'OFEN, adaptées aux surfaces respectives des scénarios.

Hypothèses clim./ventilation	2015	2050 nW	2050 tendanciel
Nombre de degré-jours de refroidissement	147	280	280
Rendement climatiseurs	2.56	4.2	3.5
Energie finale par surface ventilée [kWh/m2.an]	1.32	0.87	1.01
Température de refroidissement [2015 =0]	0.00	2.00	0.00
Part des logements avec climatisation	2.3%	20%	34%
Part logements avec ventilation mécanique	6.0%	28.8%	16.5%
Part de surface climatisée tertiaire	33.3%	43.5%	75.0%

Tableau 5 : Hypothèses des scénarios négaWatt et tendanciels pour la climatisation et la ventilation

6 Résultats

6.1 Surfaces

Du fait de l'augmentation de la part des logements mutualisés et la diminution des résidences secondaires chauffées en permanence, le scénario négaWatt présente une SRE plus faible que dans le scénario tendanciel (Figure 6). La surface totale augmente cependant dans les deux scénarios de par l'augmentation de la population. Cependant, rapportée à la population, on constate que les hypothèses du scénario négaWatt permettent une baisse des besoins de surface par personne contre une augmentation de 7 m²/pers dans le cas tendanciel, impliquant un gain conséquent lorsque toute la population est concernée.

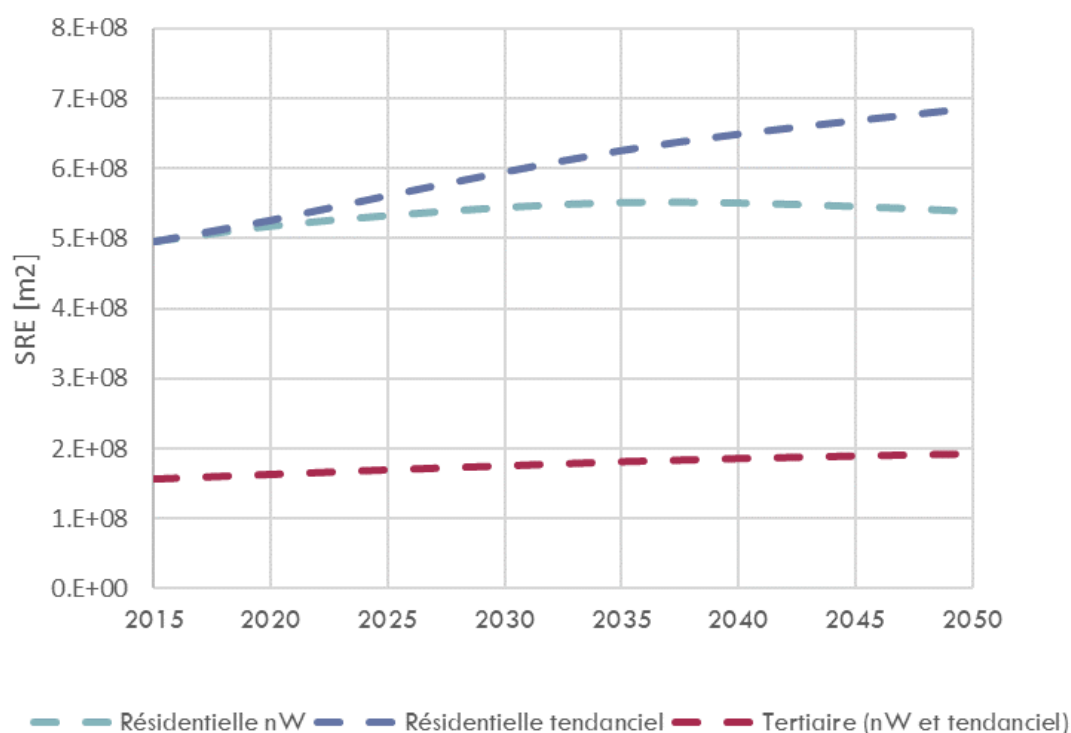


Figure 6 SRE [m²] résidentielle et tertiaire des scénarios négaWatt et tendanciel

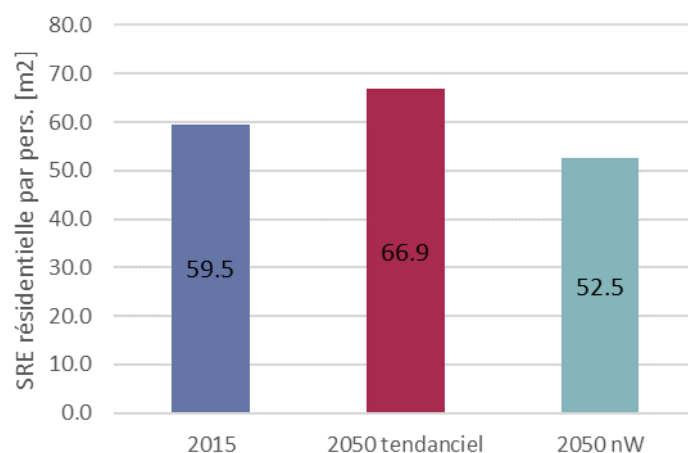


Figure 7 : SRE résidentielle par personne selon les variantes négaWatt et tendancielle

Pour atteindre ces résultats, des efforts de constructions et de planifications conséquents sont nécessaires pour permettre la création de coopératives ou de logements mutualisés. Précisons que ce type de logement pourrait être particulièrement adapté aux futures structures familiale ; avec des ménages plus petits cherchant potentiellement à éviter un trop fort isolement sociale (Bierwirth & Thomas, 2019). La réduction forte des SRE par personne vient des hypothèses de modélisation qui considèrent les surfaces de résidences secondaires non-chauffées comme étant hors de la SRE. Sans cette hypothèse, le modèle négaWatt arriverait à 58.5 m² en 2050, soit une réduction légère par rapport à la situation actuelle, un résultat déjà très intéressant au vu de l'augmentation de la surface par personne observée ces dernières années.

En ce qui concerne la surface par emploi dans le tertiaire, il a été choisi de la fixer à la valeur d'aujourd'hui et non de suivre la tendance actuelle à la baisse car le but n'est pas de péjorer les conditions de travail en instaurant systématiquement des openspaces ou de places de travail partagées afin d'optimiser les espaces selon les temps partiels ou le télétravail. De plus, cette option semble peu pertinente car il y a à priori quelques jours par semaine où tous les employés se rendent sur leur lieu de travail.

6.2 Chauffage

En ce qui concerne la demande en énergie finale, les mesures de sobriété (surface et température) et d'efficacité (rénovation et chaudières) combinées permettent d'abaisser la consommation de manière significative, passant de 246 PJ en 2015 à 112 PJ en 2050 en combinant les ménages et le secteur tertiaire, soit une réduction de 54% alors que le scénario tendanciel n'atteint que 219 PJ en 2050 (-11%). Il est cependant important de noter qu'une large part de l'énergie finale est puisée dans l'environnement grâce aux pompes à chaleur dans le scénario négaWatt. Si on considère cette énergie comme gratuite, la demande en énergie passe de 223 PJ (contre 243 PJ) en 2015 à 58 PJ (contre 112 PJ) en 2050 (-74%).

La sobriété (surfaces résidentielles plus faibles, non-chauffage des résidences secondaires et température plus basse en hiver) permet de réduire de 27% la demande globale (-30% pour la demande des ménages seuls). C'est cependant le programme de rénovation et constructions à basse énergie, couplé à la diffusion massive d'énergies renouvelables dans les chaudières, qui permet de réduire les besoins de la manière la plus importante. En effet, l'énergie finale diminue de plus d'un tiers (-37%) par rapport au scénario avec la sobriété seule. Il est à noter que les améliorations d'efficacité des chaudières réduisent les besoins en énergie finale de manière assez marginale, mis à part pour les pompes à chaleurs qui permettent de satisfaire un plus large besoins.

Finalement, il est intéressant de constater que le scénario négaWatt, comme les perspectives 2050+ de la confédération (OFEN 2020b), permet de décarboner le mix énergétique, pour autant que l'électricité et la chaleur à distance soient renouvelables. La consommation d'électricité diminue également grâce à la réduction de la part des chauffages directs et l'amélioration forte de l'efficacité des pompes à chaleur, permettant de passer de 21 PJ en 2015 à 14 PJ en 2050.

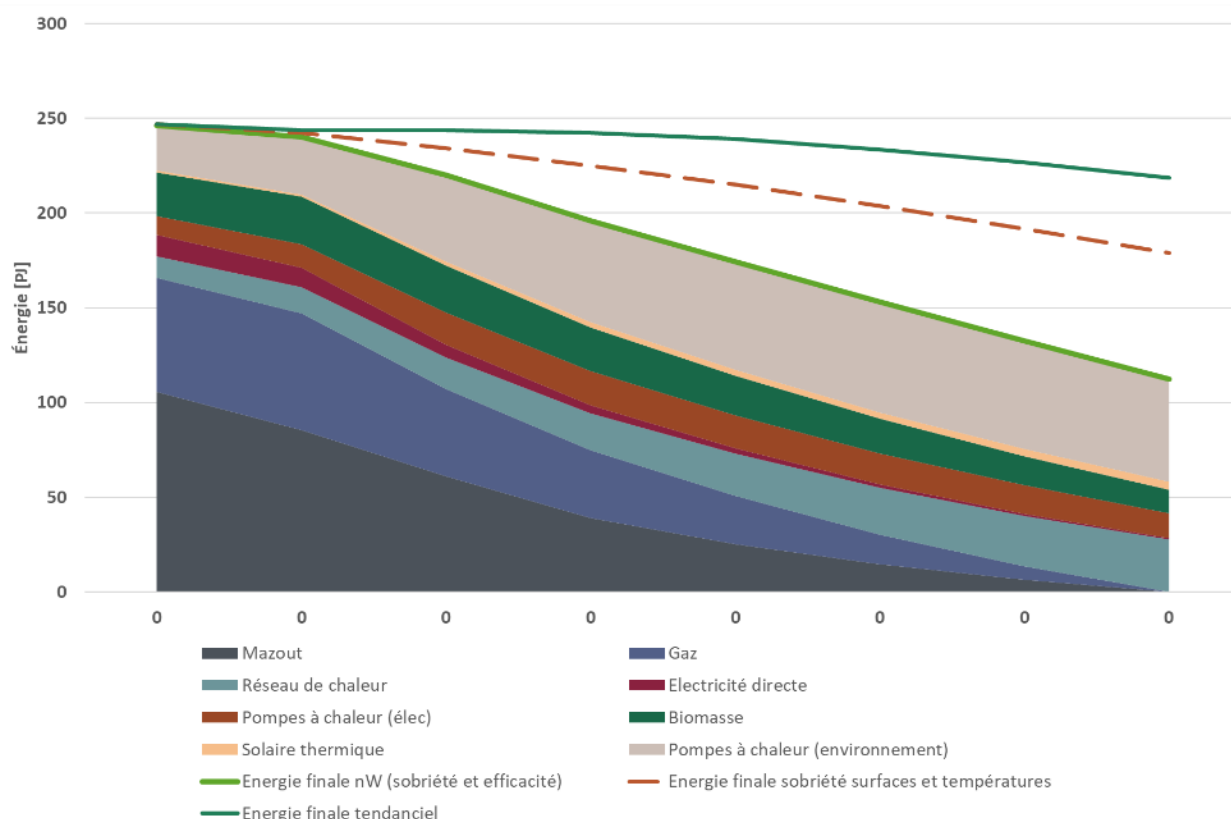


Figure 8 : Evolution de l'énergie finale pour le chauffage des bâtiments résidentiels et tertiaires

Au regard de l'évolution des besoins utiles par unité de surface, une nette diminution entre 2015 et 2050 est constatée avec une évolution de 92 kWh/m².an à 40 kWh/m².an. Pour comparaison, le scénario tendanciel ne diminue ces besoins en énergie utile que jusqu'à 65.2 kWh/m².an en 2050.

Performance énergétique	2015	2020	2025	2030	2035	2040	2045	2050
Bâtiments existants non-rénovés [kWh/m ² .an]	95	94	91	88	85	81	75	69
Bâtiments rénovés [kWh/m ² .an]	69	69	48	29	28	27	26	25
Bâtiments neufs [kWh/m ² .an]	45	45	31	18	17	16	16	15
Besoins moyens du parc [kWh/m².an]	95.2	90.1	81.4	71.0	61.9	54.0	46.9	40.3

Tableau 6 : Besoins en énergie de chauffage utile par unité de surface

6.3 Climatisation, ventilation et gestion du bâtiment

En ce qui concerne les besoins en climatisation, ventilation et gestion du bâtiment dans les ménages, ils doublent pour passer de 7.2 PJ à 14.8 PJ en 2050 dans le scénario tendanciel. Si, en 2015, cette consommation est très largement due à la gestion du bâtiment et en particulier aux énergies auxiliaires (4.55 PJ), l'augmentation est presque exclusivement causée par des besoins en climatisation, qui passent de 0.3 PJ en 2015 à 7.2 PJ en 2050. La sobriété a donc un grand rôle à jouer, car dans le scénario négaWatt, la réduction par rapport à la modélisation tendancielle vient particulièrement de la limitation de la part de la surface climatisée. La sobriété permet de réduire les besoins globaux dans le secteur des ménages à 9.2 PJ, et l'efficacité des systèmes permet une réduction supplémentaire pour atteindre 7.8 PJ en 2050.

Pour les surfaces tertiaires, une part déjà plus importante de climatisation et de ventilation de confort est constatée dès 2015. Des 17.2 PJ consommés au total lors de cette année de base, 15.1 PJ provenaient déjà de ces deux catégories. Là encore, l'enjeu de la sobriété est tout d'abord d'éviter au maximum d'installer de la climatisation, tout en augmentant la température cible pour consommer moins d'énergie lorsqu'un tel système est en place. Ces mesures permettent de stabiliser la consommation, qui n'est que de 20.6 PJ en 2050 contre une explosion à 37.6 PJ dans le scénario tendanciel. L'ajout des améliorations d'efficacité permet de réduire légèrement cette consommation à 18.6 PJ en 2050 dans le scénario négaWatt.

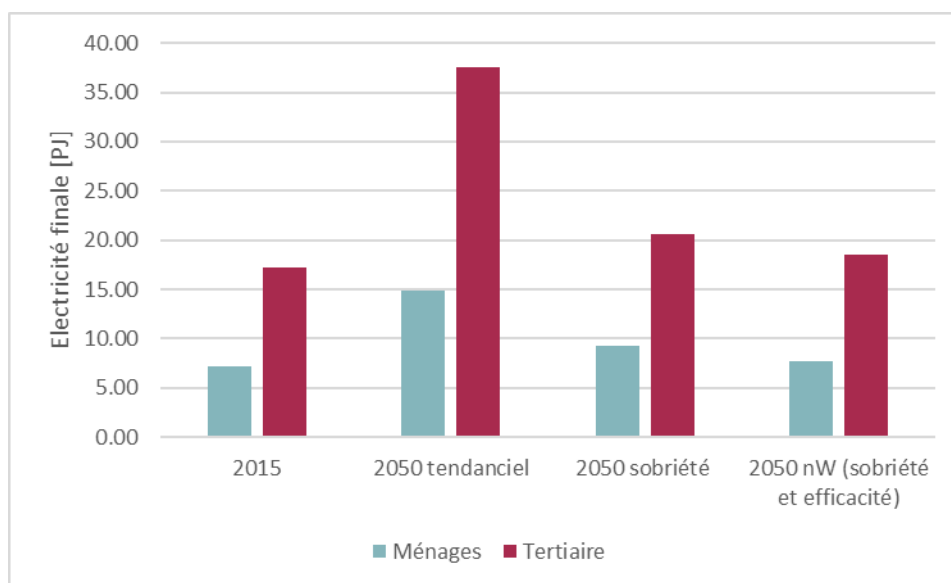


Figure 9 : Consommation d'énergie finale (électricité) pour la climatisation, ventilation et gestion du bâtiment dans les différents scénarios

7 Discussion

7.1 Surfaces

En ce qui concerne l'évolution des surfaces, le scénario négaWatt table principalement sur une évolution structurelle du parc de logement. En effet, la Suisse, et plus particulièrement les milieux urbains (73% de la population), ont un taux de vacance très bas, avec pour conséquence une possibilité très restreinte de choisir son logement. Ainsi, la diminution des espaces habitables ne peut se baser uniquement sur des choix individuels et doit découler d'une évolution des logements vers des typologies plus durables, avec des surfaces habitables par personne moindres, tout en garantissant un cadre de vie de qualité. Pour ce faire, il est posé comme hypothèse que la part des logements mutualisés va continuer d'augmenter durant ces prochaines années, permettant ainsi de diminuer les surfaces individuelles. Cette augmentation découle d'une politique déjà mise en œuvre dans certaines villes, notamment à Zürich, où l'objectif est d'atteindre 30% de logements d'utilité public en 2050, sachant que cette part est déjà de 20% aujourd'hui. En conséquence, l'augmentation de la part des logements en coopératives et mutualisés - avec par définition des surfaces habitables par habitant faibles en comparaison des locations et propriétés - permet de contenir l'augmentation générale des surfaces résidentielles actuellement observée, sans pour autant diminuer les surfaces habitables par personne selon les modes d'occupation.

Ce choix de modélisation sur une sobriété « étatique » plus « qu'individuelle » peut être perçu comme fort car il diminue les possibilités de chacun de choisir son logement. Toutefois, précisons que l'objectif est d'atteindre 25% de logements mutualisés dans les espaces urbains en 2050 et non la totalité, ce qui finalement amène une plus grande diversité dans le type de logements à disposition et donc augmente potentiellement les possibilités de choix. De plus, des logements coopératifs et mutualisés pourraient être mieux adaptés à la population de 2050 dont les ménages – plus petits par une évolution de la cellule familiale actuelle - souhaiteraient potentiellement vivre avec des espaces mutualisés qui offriraient la possibilité d'avoir plus de liens sociaux.

Une large part de la réduction des surfaces résidentielle dans le modèle est à imputer au non-chauffage des résidences secondaires lorsqu'elles ne sont pas occupées. Ce facteur explique une réduction de 6 m² par personne des surfaces chauffées. Sachant que les résidences secondaires représentent près de 20% du parc de logement, cette part d'environ 10% semble plausible, mais nécessite une évaluation plus poussée au vu de son ampleur sur les résultats. Il est intéressant de noter que, sans considérer cette réduction, le scénario négaWatt arrive à stabiliser les surfaces habitables par personne et même à les faire très légèrement baisser d'ici à 2050, ce qui n'est de loin pas le cas de l'évolution tendancielle.

Cependant, ces changements des modes d'habitat doivent surmonter plusieurs difficultés. Un travail en *focus groupe* avec des experts du secteur (10.09.2020) a permis de mettre en évidence les principaux freins et leviers d'actions pour parvenir à plus de sobriété en termes de surface. En plus des politiques structurelles d'aménagement du territoire permettant l'implémentation de logements mutualisés ou simplement de logements adaptés à une taille des ménages en diminution, il faut œuvrer à réinventer le rapport à l'habitat et valoriser les logements plus petits grâce à la mise en avant de projets exemplaires, flexibles et multifonctionnels, ainsi qu'une meilleure intégration des logements dans l'espace urbain de manière générale. Des aides doivent également être apportées pour faciliter la mobilité résidentielle, en particulier pour les ménages âgés vivant dans de grands logements après le départ des enfants. La création d'agences locales de placement permettant de permuter son logement pour mieux l'adapter à la taille de son ménage tout en restant dans le même quartier et pour un loyer similaire permettrait par exemple de casser certaines des principales barrières au déménagement pour ce type de population.

De manière générale, la modélisation pourrait être optimisée par le développement d'une enquête similaire au microrecensement transport (2017) qui, en plus d'informations quantitatives, met en évidence des tendances qualitatives sur les pratiques de déplacements. Un tel sondage permettrait de

mieux comprendre les perceptions et besoins en logement de chacun et ainsi, par croisement entre des données qualitatives et quantitatives, il serait possible d'estimer plus précisément les surfaces habitables par personne minimum qui permettraient de garantir un cadre de vie de qualité.

En ce qui concerne les surfaces du tertiaire, la modélisation est simple et propose de garder la surface par employé au niveau actuel dans le futur. Il faut toutefois noter que les surfaces de références énergétiques par employés semblent très grandes, 41 m²/pers, soit presque l'équivalent de la surface habitable par personne (46 m²/pers et 59 m² de SRE/pers). Cette valeur pose des questions sur la répartition des surfaces du tertiaire qui devrait être étudiées plus en détail. En effet, certains chiffres précisent que les surfaces par employé sont passées de 18 m² à 13 m² (à Genève) dans les dix dernières années, une diminution très forte qui a beaucoup moins touchée les SRE passant de 43 m² à 42 m² sur la même période. Il est ainsi probable que de grands espaces, tel que les halls d'entrée ou salles de réunion impressionnantes, soient destinés à des usages « communs » ou dans un but de « promotion », alors qu'en parallèle les espaces de travail par employé restent faibles. Si tel est le cas, il serait possible de diminuer fortement ces espaces « communs » est ainsi de réduire les coûts énergétiques de chauffage. Une autre explication pourrait être les besoins croissants de certains secteurs, comme le milieu hospitalier, où le nombre de lits par chambre tend à diminuer. Sans précisions supplémentaires sur les causes de ces évolutions il est difficile de poser des hypothèses de modélisation fiables. C'est pour cette raison qu'une variante avec stabilité des SRE par employé est proposée.

7.2 Chauffage

En ce qui concerne les besoins en chauffage, les hypothèses utilisées pour calculer les besoins en chaleur utile des bâtiments nouveaux et rénovés restent évidemment une approximation de la réalité. Dans une première approche, un taux de rénovation des bâtiments de 2% a été fixé, ce qui permet de rénover les deux tiers du parc actuel d'ici à 2050. La faisabilité et les coûts d'une politique plus ambitieuse pourraient être évalués.

En moyenne sur le parc, les besoins en chaleur utile sont de 95.2 kWh/m² en 2015 et descendent à 40.3 kWh/m² en 2050. La première valeur est cohérente et correspond aux besoins du parc donnés par l'OFEN majorés par un surchauffage de 2°C, comme prévu dans les hypothèses. En effet, selon la répartition des systèmes de chauffage donnée pour 2015 dans les statistiques énergétiques et les hypothèses de rendement considérées dans le scénario négaWatt, les besoins moyens du parc sont d'un peu plus de 84 kWh/m². Dans le parc total, cette différence de 2°C explique l'écart entre l'énergie finale donnée par les statistiques de l'OFEN et celle considérée dans négaWatt (218 PJ et 246 PJ respectivement). Quant à la valeur atteinte en 2050, elle dépend des hypothèses d'amélioration des performances énergétiques des bâtiments neufs et rénovés, ainsi que des taux considérés. Elle est donc plus difficile à évaluer a priori.

De manière générale, la performance thermique globale des bâtiments en 2050 selon les hypothèses de ce rapport se base sur des besoins en chaleur respectant le label « passivhaus » pour la plupart des bâtiments neufs et rénovés. Cette hypothèse est inspirée de celles prises par le scénario NPE de l'OFEN. Cette variante de la Confédération est particulièrement efficace, en considérant que les besoins en chaleur utile moyens dans le parc atteignent 21.1 kWh/m² en 2050. Cette performance est possible car les rénovations et nouvelles constructions sont très vite efficaces, en atteignant le label passivhaus dès 2030 en moyenne pour presque tous les types de constructions. Le scénario négaWatt Suisse considère un gain moins important, notamment en ce qui concerne les bâtiments rénovés qui atteignent en moyenne 25 kWh/m².an.

Cependant, la consommation des bâtiments dans le scénario de l'OFEN 2012 semble très optimiste. Dans les hypothèses de négaWatt France, les bâtiments neufs atteignent 15 kWh/m² dès 2020, que ce soit pour les maisons individuelles ou les immeubles collectifs. Dans ce même scénario, les bâtiments rénovés ont des besoins situés entre 40 et 45 kWh/m², là aussi dès 2020. Les mêmes valeurs de besoins en chaleur des bâtiments neufs et rénovés sont considérées jusqu'en 2050. Pour le parc complet actuel,

négaWatt France estime les besoins en chaleur moyens à 85 kWh/m² pour les immeubles collectifs et 92 kWh/m² pour les maisons individuelles. La performance moyenne générale en 2050 du scénario français, en considérant les bâtiments actuels non rénovés, les rénovations et les nouvelles constructions, est proche des 40 kWh/m², soit plus cohérente avec les résultats de ce rapport.

La température extérieure joue également un rôle majeur dans la consommation d'énergie de chauffage. L'impact du réchauffement climatique sur les besoins en chauffage sera sans aucun doute significatif. Dans les scénarios de la Confédération (OFEN, 2012), une réduction des degrés-jours induit une réduction de 15% des besoins en chauffage en 2050, par rapport à la période 1984-2002. L'augmentation de la température moyenne considérée y est de 1.84°C. Dans le scénario négaWatt Suisse, on peut considérer que la réduction des besoins en chaleur est implicitement comprise dans l'amélioration des performances de chauffage des bâtiments. L'évolution du nombre de kWh/m² requis est donc une combinaison de mesures d'efficacité et de la réduction « naturelle » des besoins en chauffage, sur lesquelles vient s'ajouter la sobriété en termes de température intérieure. Cependant, cette réduction pourrait légitimement également être ajoutée à celle technique, permettant une réduction supplémentaire des besoins. Il est à noter que les nouvelles perspectives énergétiques de la confédération (OFEN, 2020) ne considèrent qu'une réduction d'environ 5% du nombre de degrés-jours chauffés.

Quant à l'évolution des systèmes de chauffage, l'hypothèse de décarbonisation provient des perspectives 2050+. Les rapports actuellement disponibles ne donnent cependant pas de détails sur l'évolution exacte de la part des différents types de chaudières, ce qui fait que les valeurs utilisées dans ce scénario se basent sur des estimations personnelles inspirées des résultats globaux de ces perspectives, ainsi que des résultats plus détaillés présentés dans les anciennes versions, notamment dans le scénario NPE (OFEN, 2012).

Comme pour les surfaces, un groupe de discussion d'expert s'est penché sur la question des besoins en chauffage, tant en termes de sobriété que d'efficacité, pour identifier les barrières et leviers à adopter pour permettre et faciliter la transition. La communication et l'information sur les moyens d'adapter son confort thermique, de réduire la consommation de son chauffage ou de changer de chaudière sont particulièrement importants, car ces sujets sont encore méconnus par une part importante de la population. Un « monsieur bâtiment » pourrait par exemple être la personne de référence d'un immeuble ou d'un quartier pour donner des conseils énergétiques aux ménages. Il est de plus crucial de donner les clés de la consommation aux habitants, en leur permettant d'adapter facilement la température, idéalement par pièce, et en étant transparent sur leur consommation. En ce qui concerne les rénovations, les freins sont souvent financiers pour les petits propriétaires, en plus des lourdeurs administratives. Les régies peuvent également renoncer aux rénovations pour des raisons financières (pas toujours possible de répercuter les frais sur les loyers). Des obligations d'assainir ou, du moins, d'audit énergétique pourraient à terme être mis en place. Les meilleures techniques de construction et rénovation doivent être rapidement appliquées, ce qui passe par de la formation massive dans le secteur. Enfin, en complément, des solutions low-tech de réduction des besoins, ainsi que des optimisations des systèmes de chauffage en place, pourraient permettre d'obtenir des résultats sans grands efforts financiers.

En ce qui concerne les bâtiments tertiaires, la modélisation s'est faite en se basant sur les besoins utiles des immeubles collectifs résidentiels et en considérant que les taux de rénovation, ainsi que la répartition et le rendement des systèmes de chauffage, sont les mêmes que pour les ménages. La sobriété sur la température, actuellement trop haute de 2°C, est également considérée. Ces hypothèses, et en particulier la première, sont des simplifications qui pourraient être affinées par la suite, si nécessaire. On constate néanmoins que les scénarios de la Confédération se basent aussi sur une certaine similitude entre les bâtiments de services et d'habitation, en considérant par exemple des taux de rénovations dans le secteur tertiaire identiques à ceux des immeubles collectifs.

Une piste de développement futur est approchée par le scénario négaWatt France, qui donne des estimations des besoins en chauffage des bâtiments du secteur tertiaire selon le type d'activité. On

peut constater que ces besoins sont très variables en 2020 et globalement plus hauts que pour les immeubles individuels considérés dans le même scénario (performance de 85 kWh/m²). Cependant, il semble que sous l'impulsion des rénovations du parc et de la construction de nouveaux bâtiments performants, les besoins en 2050 sont plus homogènes dans le secteur tertiaire, est également plus proches des 37 kWh/m² obtenus pour les immeubles collectifs.

		2010	2020	2030	2040	2050
Cafés, hôtels	kWh/m ² .an	158,5	140,0	100,6	66,7	37,0
Habitat communautaire	kWh/m ² .an	98,4	86,5	63,3	46,3	34,0
Santé, action sociale	kWh/m ² .an	110,0	95,4	69,8	50,2	35,8
Enseignement, recherche	kWh/m ² .an	85,7	81,0	65,2	49,1	36,7
Sport, loisirs	kWh/m ² .an	124,0	115,3	86,1	59,5	36,5
Bureaux, administrations	kWh/m ² .an	138,6	123,0	90,5	62,4	37,3
Commerce	kWh/m ² .an	106,3	100,5	77,3	55,3	38,2
Transport	kWh/m ² .an	145,2	138,0	103,7	72,1	44,6

Figure 10 : Besoins en chaleur par m² dans le secteur tertiaire, par type d'activité (négaWatt France, 2018).

7.3 Climatisation, ventilation et gestion du bâtiment

La précision des hypothèses de climatisation, ventilation et gestion du bâtiment pourrait être améliorée dans une prochaine version du scénario. En effet, ces modélisations se basent largement sur les hypothèses prises par les scénarios de l'OFEN de 2012.

Premièrement, en ce qui concerne la ventilation de confort, une modélisation plus précise prendrait en compte le taux de rénovation et construction de bâtiments et inclurait un pourcentage, certainement plus élevé, représentant plus fidèlement le nombre de bâtiments utilisant ce type de ventilation pour assurer une bonne circulation de l'air intérieur. L'énergie de récupération de chaleur pourrait également être incluse explicitement et être liée aux besoins en chauffage.

Pour la climatisation, une meilleure évaluation des différentes techniques et de leur potentiel pourrait être effectuée pour obtenir un part des surfaces résidentielles et tertiaires climatisées plus précise pour le futur. Aussi, ces besoins sont liés au nombre de jours refroidis, qui sont directement influencés par le réchauffement climatique en cours. Cette augmentation des besoins a été prise en compte dans cette modélisation, mais en se basant sur les estimations de l'OFEN en 2012 pour les perspectives énergétiques, ce qui pourrait être affiné avec des perspectives plus récentes. Des besoins pourraient également être explicitement liés aux performances énergétiques des bâtiments (rénovations et qualité des nouvelles constructions). Dans le secteur tertiaire, les besoins pourraient également être différenciés selon le type d'activité, comme il a été fait dans le scénario négaWatt français (négaWatt, 2017).

Finalement, les consommations liées à la gestion du bâtiment pourraient également être mieux intégrées que simplement par un rapport des surfaces basé sur les perspectives de l'OFEN de 2012. En particulier, les besoins en énergie auxiliaire devraient être liés aux types de chaudières installées dans les bâtiments.

Pour ces trois catégories réunies, on remarque la grande importance de la surface considérée comme climatisée dans le futur. On constate également que les besoins de ces postes de consommation pourraient augmenter considérablement (doublement dans le scénario tendanciel) si rien n'est entrepris dans le futur. Il s'agit donc d'une situation à surveiller de près, et la modélisation devraient être plus explicite, y compris dans les perspectives énergétiques de l'OFEN sur lesquelles sont grandement basés ces résultats. En fonction des détails publiés par les perspectives 2050+ en 2021, une réévaluation de ces besoins pourrait être intéressante, voir nécessaire.

8 Conclusion

La consommation d'énergie pour le chauffage est de loin la plus importante dans les bâtiments suisses, et devrait le rester d'ici à 2050. L'électricité finale consommée par les systèmes de refroidissement et de ventilation risque de son côté de prendre de l'importance, sous l'effet du réchauffement climatique et des nouveaux bâtiments très isolés ayant besoin de renouvellement de l'air intérieur. Ces postes de consommation dépendent de la surface résidentielle et tertiaire, qui devrait selon les prévisions de population et de structure des ménages augmenter considérablement dans les prochaines années. L'enjeu de ce scénario négaWatt a été d'estimer ces évolutions et de tenter de les limiter en jouant notamment sur l'intégration de la sobriété énergétique pour ces trois domaines (chauffage, climatisation et surfaces).

Plusieurs types de sobriété ont été intégrés dans le scénario négaWatt. La sobriété structurelle, demandant des changements dans la planification et se traduisant par une plus grande part de logements mutualisés et adaptés à une taille des ménages de plus en plus petite dans le futur. Un agencement des bâtiments et des plans de quartiers bien pensés qui permet également de limiter les besoins en climatisation en favorisant les flux d'air entre les logements et en rendant possible une aération nocturne agréable par une mobilité apaisée. A côté de ça, des actions de sobriété comportementale, telles que le choix d'une température intérieure moins gourmande en énergie tant en été qu'en hiver ou le fait de ne pas chauffer sa résidence secondaire lorsqu'elle n'est pas habitée, permettent également des gains intéressants. Cette sobriété doit être accompagnée par des campagnes de sensibilisation et d'aide au changement, mais également être permise par des infrastructures adaptées et facilement utilisables (possibilité de régler sa température, de contrôler le chauffage des résidences secondaires à distance, etc.).

Des changements importants et rapides en termes de rénovation des bâtiments, d'efficacité accrue des nouvelles constructions et de diffusion massive de technologies renouvelables et hautement efficaces sont bien sûr également requis pour permettre d'atteindre zéro émission de carbone nette en 2050. La sobriété permet cependant de faciliter cette transition en limitant la demande. Elle pourrait s'avérer particulièrement cruciale en ce qui concerne la demande en électricité, qui risque fortement d'augmenter en remplaçant les combustibles fossiles par des pompes à chaleur. En effet, à la suite de la sortie du nucléaire, la production d'électricité suisse devra se baser uniquement sur des technologies renouvelables ou sur des importations. Les premières étant fluctuantes, une réduction des besoins pourrait permettre d'éviter des blackouts potentiels lors des pics de demande, tout en limitant la nécessité des technologies de stockage. La réduction des importations est bénéfique d'un point de vue de la sécurité énergétique, mais permet aussi de s'assurer de la provenance de ces énergies et d'éviter d'utiliser des centrales à charbon qui seraient encore en activité, en Allemagne ou en Pologne par exemple.

Ce scénario cible montre les efforts structurels, comportementaux et techniques à adopter pour atteindre les objectifs climatiques ambitieux dans les temps impartis. Une transition basée sur les trois piliers négaWatt-sobriété, efficacité et renouvelable – est possible pour ces postes de consommations clés du secteur des bâtiments, mais demande des efforts combinés à tous les niveaux et doit par conséquent démarrer dès aujourd'hui pour avoir une chance de se réaliser.

9 Références

- ADEME. (2013). *L'exercice de prospection de l'ADEME, vision 2030-2050* [Document technique]. ADEME. <https://www.ademe.fr/contribution-lademe-a-lelaboration-visions-energetiques-2030-2050>
- ASLOCA. (2020). *Genève-Quand le bailleur doit-il encencher le chauffage?* asloca.ch. <http://www.asloca.ch/geneve/2016/10/21/geneve-quand-le-bailleur-doit-il-enclencher-le-chauffage/>
- Bernet, C. (2017). Toujours moins de place au bureau. TDG. <https://www.tdg.ch/geneve/actu-genevoise/toujours-place-bureau/story/24717420>
- Bierwirth, A., & Thomas, S. (2019). *Energy sufficiency in buildings*. https://www.energysufficiency.org/static/media/uploads/site-8/library/papers/sufficiency-buildings-final_v2.pdf
- Bon à Savoir. (2011). *Chauffage: Un bâtiment tempéré est un droit*. bonasavoir.ch. <https://www.bonasavoir.ch/914303-chauffage-un-appartement-tempere-est-un-droit>
- Danielsson, C. B., & Bodin, L. (2009). DIFFERENCE IN SATISFACTION WITH OFFICE ENVIRONMENT AMONG EMPLOYEES IN DIFFERENT OFFICE TYPES. *Journal of Architectural and Planning Research*, 26(3), 241–257.
- Delbiaggio, K. & Wanzenried, G., 2016. *La consommation effective et le besoin subjectif de surface habitable*, Luzern: Office fédéral du logement (OFL) & Hochschule Luzern - Wirtschaft
- EnDK. (2018). *Modèle de prescription énergétique des cantons (MoPEC), édition 2014, version française (Mise à jour 2018 en raison de normes modifiées)*. Conférence des directeurs cantonaux de l'énergie.
- European Commision. (2019). *People in the EU - statistics on housing conditions—Statistics Explained*. https://ec.europa.eu/eurostat/statistics-explained/index.php/People_in_the_EU_-_statistics_on_housing_conditions
- Fernandez, V. (2016). Le télétravail, remède à l'éparpillement. In *Sciences Humaines*. https://www.scienceshumaines.com/le-teletravail-remede-a-l-eparpillement_fr_36942.html
- Fleury-Bahi, G., & Marcouyeux, A. (2017). Évaluer la satisfaction envers l'espace de travail : Développement d'une échelle et première validation. *Psychologie du Travail et des Organisations*, 23(1), 1-13. <https://doi.org/10.1016/j.pto.2017.01.001>
- Huber, H. (2010). *Ventilation de confort*. Editions Minergie, Berne. https://www.minergie.ch/media/komfortlueftung_s1_8_fr.pdf
- Jorio, L. (2018). swissinfo.ch. https://www.swissinfo.ch/fre/climat-et-%C3%A9nergie_et-si-au-lieu-de-2-degr%C3%A9s-de-plus--on-en-avait-2-de-moins-/43840280
- Khoury, J. (2014). *Rénovation énergétique des bâtiments résidentiels collectifs: État des lieux, retours d'expérience et potentiels du parc genevois* [Université de Genève]. <https://archive-ouverte.unige.ch/unige:48085>
- Khoury, J., Alameddine, Z., & Holmuller, P. (2017). Understanding and bridging the energy performance gap in building retrofit. *CISBAT 2017 International Conference – Future Buildings & Districts – Energy Efficiency from Nano to Urban Scale*. <https://doi.org/10.1016/j.egypro.2017.07.348>
- Konkol, Schanné, Lange, Weichbrodt, Degenhardt, Schulze, Kleibrink, Coradi, Sweingruber, Metzger-Pegau, Neck, Gisin, Wieser, & Windlinger. (2017). *Environnements de bureaux et Workplace Change Management favorables à la santé – guide Recommandations d'action pour la*

promotion de la santé psychique du personnel dans le cadre de la planification, de la mise en œuvre et de la gestion de bureaux dans les entreprises suisses. Promotion Santé Suisse, Berne et Lausanne.

- Lenormand, P. (2016). *Le chiffre faux que tout le monde reprend sans réfléchir*. incub.net. <https://www.incub.net/economie-chauffage-1-degre/>
- Minergie (2020). *6 questions sur la ventilation des habitations*. Interview du Prof. Heinrich Huber (HES Lucerne), minergie.ch. Accédé le 09.12.2020 <https://www.minergie.ch/fr/batiments/exemples-pratiques/interview-huber/>
- Minergie. (2019). *Aide à l'utilisation des labels Minergie/Minergie-P/Minergie-A, version 2019.1*. Minergie, SuisseEnergie. https://www.minergie.ch/media/190404_anwendungshilfe_minergie_p_a_v2019.1_fr.pdf
- Moissonier. (2018). *Quel est votre environnement de travail idéal ?*
- négaWatt. (2017). *Scénario négaWatt 2017-2050-Hypothèses et résultats*. https://negawatt.org/IMG/pdf/scenario-negawatt_2017-2050_hypotheses-et-resultats.pdf
- OFEN. (2012). *Perspectives énergétiques 2050*. <https://www.bfe.admin.ch/bfe/fr/home/politique/strategie-energetique-2050/documentation/perspectives-energetiques-2050.html>
- OFEN. (2020a). *Statistique globale de l'énergie*. <https://www.bfe.admin.ch/bfe/fr/home/approvisionnement/statistiques-et-geodonnees/statistiques-de-lenergie/statistique-globale-de-l-energie.html>
- OFEN (2020b). *Energieperspektiven 2050+ Kurzbericht*, <https://www.bfe.admin.ch/bfe/fr/home/politique/perspectives-energetiques-2050-plus.html>
- OFEV. (2019). *Surface de référence énergétique*. <https://www.bafu.admin.ch/bafu/fr/home/themen/thema-klima/klima--daten--indikatoren-und-karten/klima--indikatoren/indikator-klima.pt.html/aHR0cHM6Ly93d3cuaW5kaWthdG9yZW4uYWRtaW4uY2gvUHVibG/ljL0FlbURLdGFpbD9pbmQ9UVUwNDgmbG5nPWZy.html>
- OFEV. (2020). *Surface habitable*. <https://www.bafu.admin.ch/bafu/fr/home/themen/thema-klima/klima--daten--indikatoren-und-karten/klima--indikatoren/indikator-klima.pt.html/aHR0cHM6Ly93d3cuaW5kaWthdG9yZW4uYWRtaW4uY2gvUHVibG/ljL0FlbURLdGFpbD9pbmQ9UVUwMDkmbG5nPWZy.html>
- OFL. (2017). *Le point sur le logement d'utilité publique. Une comparaison avec le locatif et la propriété*. 69.
- OFS. (2017). *Scénarios des ménages*. <https://www.bfs.admin.ch/bfs/fr/home/statistiques/population/evolution-future/scenarios-menages.html>
- Pagliano, L. et Erba, S. (2019). *Energy sufficiency in (strongly intertwined) building and city design – examples for temperate and Mediterranean climates*. ECCE summer study proceeding, 1505-1514.
- Peltier, C. (2019). *A Zurich, « la coopérative est au service d'une ville plus inclusive et plus durable »*. https://www.lemonde.fr/economie/article/2019/12/10/a-zurich-la-cooperative-est-au-service-d-une-ville-plus-inclusive-et-plus-durable_6022365_3234.html
- Rey, M. (2016). *La politique du logement de la ville de Zurich est un succès, avec ses limites*. <https://www.domainepublic.ch/articles/29500>

- Roulet, C.-A. (2012). *Éco-confort : Pour une maison saine et à basse consommation d'énergie*. Presses Polytechniques et Universitaires Romandes.
https://books.google.ch/books?id=wEHBZtBPEQgC&printsec=frontcover&hl=fr&source=gbs_ge_summary_r&cad=0#v=onepage&q&f=false
- SECO. (2016). *Grossraum-büros. So schützen Sie die Gesundheit der Mitarbeitenden*.
<https://awa.zh.ch/content/dam/volkswirtschaftsdirektion/awa/ai/aktuelles/Grossraumbuero%20Broschuere.pdf>
- statVD. (2018). *Besoins en logement à l'horizon 2040*.
https://www.vd.ch/fileadmin/user_upload/accueil/fichiers_pdf/Prospectif_Nos_4-5/Etude_Prospective_1_Besoins_en_logement.pdf
- SuisseEnergie (2014). *Aérer en respectant le bâtiment – Comment ventiler les logements lors de leur rénovation*, <https://www.ge.ch/document/13304/telecharger>
- SuisseEnergie (2015). *Un agréable climat ambiant - 5 recommandations pour l'été*. Campagne Froid Efficace.
- SuisseEnergie (2019). *Rester Cool – Protection thermique des bureaux et locaux commerciaux*, <https://www.suisseenergie.ch/page/fr-ch/restez-cool>
- Thomas, S., Brischke, L.-A., Thema, J., Leuser, L., & Kopatz, M. (2017). *Energy sufficiency policy: How to limit energy consumption and per capita dwelling size in a decent way*.
- Toulouse, E. et Attali, S. (2018). *Energy sufficiency in products – Concept paper*, European council for an energy efficient economy https://www.energysufficiency.org/static/media/uploads/site-8/library/papers/sufficiency-products-final_181108.pdf