

Caractérisation des usages énergétiques

1.1 Introduction

L'objectif de ce chapitre est d'extraire des méthodes paramétriques, les caractéristiques indispensables à la prédiction de flux énergétiques. Cela nous permettra de définir les capteurs et les données d'entrée par modèle et de définir si besoin les informations a priori nécessaires pour réaliser la prédiction. Cela introduit le premier niveau d'aide à la décision qui caractérise par des modèles de référence les différents flux énergétiques. Ces modèles sont utilisés aujourd'hui par les cabinets d'étude qui les utilisent pour proposer des actions de réductions du besoin en chauffage notamment.

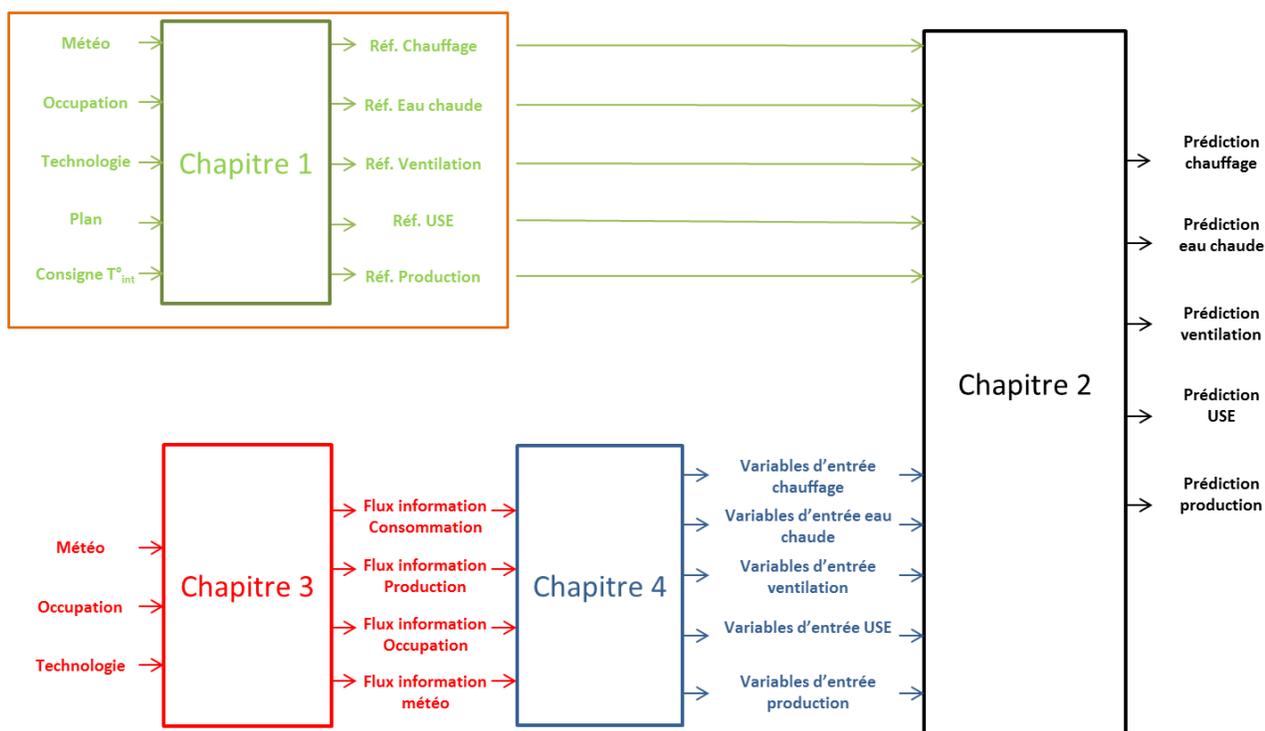


Figure 19 : Aide pour la lecture du document associée aux différents chapitres et au processus générale d'aide à la décision

1.2 Définition du système

Avant de calculer le bilan, il convient de **délimiter le système étudié** dans l'espace et dans le temps, et de définir les utilisations de l'énergie et les vecteurs énergétiques que l'on va considérer. La **limite de notre système d'étude est au niveau d'un bâtiment ou un ensemble de bâtiments** situé après le **réseau basse tension 400 V** relié à un compteur d'énergie.

A l'intérieur de ce système d'étude, plusieurs sous-systèmes peuvent exister **déterminés par une surface de référence** énergétique [SIA-380] liée au compteur d'énergie électrique. Ce compteur peut être relié à un bâtiment complet (maison individuelle) ou à une surface donnée (locaux de bureaux à l'intérieur d'un bâtiment).

La **délimitation spatiale** consiste à définir les frontières du domaine étudié, au travers desquelles passent les flux d'énergie à calculer. Pour un bâtiment, cette frontière est généralement constituée par :

- ⇒ l'enveloppe du bâtiment (Figure 18)
- ⇒ les compteurs d'entrée des sources d'énergie de réseau (électricité, gaz, chauffage à distance)
- ⇒ les entrées des combustibles (pétrole, charbon, bois)
- ⇒ les surfaces de captage d'énergie solaire
- ⇒ les raccordements d'entrée de l'eau froide
- ⇒ les raccordements de sortie des égouts

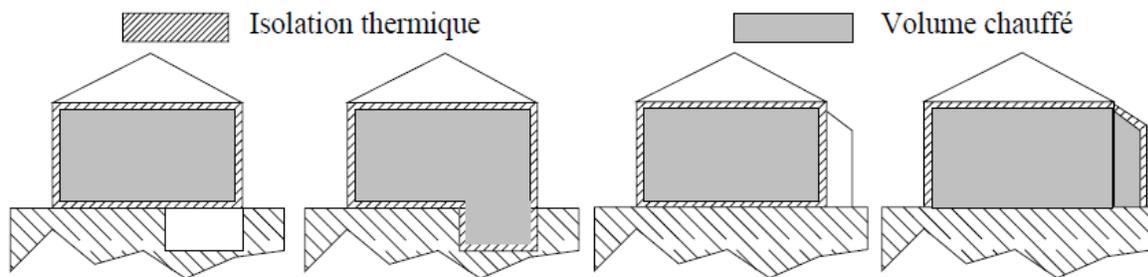


Figure 20 : Représentation de l'enveloppe du bâtiment à prendre en considération pour un bilan énergétique

La **délimitation par utilisation et par vecteur** permet de définir le système énergétique dont on s'occupe. Ces divers systèmes interagissent entre eux : ce qui peut être une perte pour un système (par exemple les pertes thermiques du four de cuisson) peut être un gain pour l'autre (ici pour le chauffage pendant l'hiver). Sans délimiter le système, on ne pourra pas définir les gains et les pertes.

Dans le bâtiment, ces systèmes sont notamment:

- ⇒ le système de chauffage
- ⇒ le système de climatisation
- ⇒ l'eau chaude
- ⇒ la cuisson
- ⇒ l'électroménager
- ⇒ l'éclairage
- ⇒ les transports et télécommunications

Les **vecteurs énergétiques** à considérer sont:

- ⇒ les combustibles (mazout, charbon, gaz, bois)
- ⇒ la chaleur à distance

- ⇒ l'électricité
- ⇒ le soleil
- ⇒ la chaleur humaine et animale

1.3 Notations

Chaque heure, notre outil doit fournir pour l'heure suivante le besoin énergétique d'un ou de plusieurs systèmes noté S , allant de 1 à n :

$$E t(i) = \sum_{S=1}^{S=n} E t(i) \quad (1.1)$$

Nous décomposons le besoin en énergie d'un système en un besoin en chauffage, un besoin en eau chaude sanitaire, un besoin en luminaires, un besoin en ventilation et un besoin en USE pour usages spécifiques électriques :

$$E t(i) = (E_{\text{Chauffage}} + E_{\text{Eau chaude}} + E_{\text{USE}} + E_{\text{Ventilation}} + E_{\text{Luminaires}}) t(i) \quad (1.2)$$

Selon les systèmes, la consommation électrique globale peut rassembler plusieurs de ces énergies.

Nous définissons la consommation électrique globale en sortie du compteur qui est égale à la somme des différents usages U électriques à l'intérieur du système étudié :

$$E_{\text{Consommation_électrique_totale}} t(i) = \sum_{U=1}^{U=d} E_{\text{Usages_électriques}} t(i) \quad (1.3)$$

Le système peut être relié à un onduleur qui ajuste la consommation et la production décentralisée. Avec $E_{\text{ENRE}}(t)$ l'énergie produite par la production décentralisée renouvelable électrique, nous avons :

$$E t(i) = (E_{\text{Chauffage}} + E_{\text{Eau chaude}} + E_{\text{USE}} + E_{\text{Ventilation}} + E_{\text{Luminaires}} - E_{\text{ENRE}}) t(i) \quad (1.4)$$

Le système peut posséder des panneaux thermiques pour la production d'eau chaude. Avec E_{ENRT} la source d'énergie décentralisée renouvelable thermique, nous avons :

$$E t(i) = (E_{\text{Chauffage}} + E_{\text{Eau chaude}} + E_{\text{USE}} + E_{\text{Ventilation}} + E_{\text{Luminaires}} - E_{\text{ENRE}} - E_{\text{ENRT}}) t(i) \quad (1.5)$$

Une partie de ces usages énergétiques peut être pilotée basée sur des prédictions par vecteur énergétique :

$$E t(i) = (+/-E_{\text{Chauffage}} +/- E_{\text{Eau chaude}} +/- E_{\text{USE}} +/- E_{\text{Ventilation}} +/- E_{\text{Luminaires}} - E_{\text{ENRE}} - E_{\text{ENRT}}) t(i) \quad (1.6)$$

Enfin, le système peut posséder un stockage électrique par batterie par exemple :

$$E t(i) = (+/-E_{\text{Chauffage}} +/- E_{\text{Eau chaude}} +/- E_{\text{USE}} +/- E_{\text{Ventilation}} +/- E_{\text{Luminaires}} +/- E_{\text{Stocké Batterie}} - E_{\text{ENRE}} - E_{\text{ENRT}}) t(i) \quad (1.7)$$

1.4 Le besoin en énergie de chauffage/climatisation

Le bilan énergétique à chaque pas de temps est une balance des entrées et des sorties d'énergie du bâtiment pendant une période de temps donnée. Ce bilan doit être équilibré, par conservation de l'énergie. Le bilan énergétique détaille toutes les pertes et tous les gains, les sommes des gains et des pertes étant égales si la période de consommation est suffisamment grande (par exemple une année, voire un mois s'il n'existe pas de capacité de stockage particulièrement grande).

L'énergie en chauffage et climatisation est la différence entre les déperditions liées à la ventilation, à la transmission et par le système d'eau chaude et les gains liés à l'apport solaire, la chaleur émise par les personnes et une énergie stockée par le bâtiment qui représente l'inertie thermique du bâtiment ou un système de stockage. Il est positif ou négatif selon la période (hiver ou été) et la température extérieure et intérieure.

Le besoin de chauffage se calcule par la différence entre les déperditions par l'enveloppe et par la ventilation, et les gains liés à la chaleur dégagée par les occupants, l'apport des gains solaires, la chaleur dégagée des appareils en fonctionnement et par l'apport d'énergie stockée dans le système (Figure 21) donné par l'équation :

$$E_{\text{Chauffage}} t(i) = \left(\begin{array}{c} D_{\text{ventilation}} + D_{\text{Transmission}} + D_{\text{Eau chaude}} \\ -G_{\text{Solaires}} - G_{\text{Appareils}} - G_{\text{Personnes}} - E_{\text{Stocké}} \end{array} \right) t(i) \quad (1.8)$$

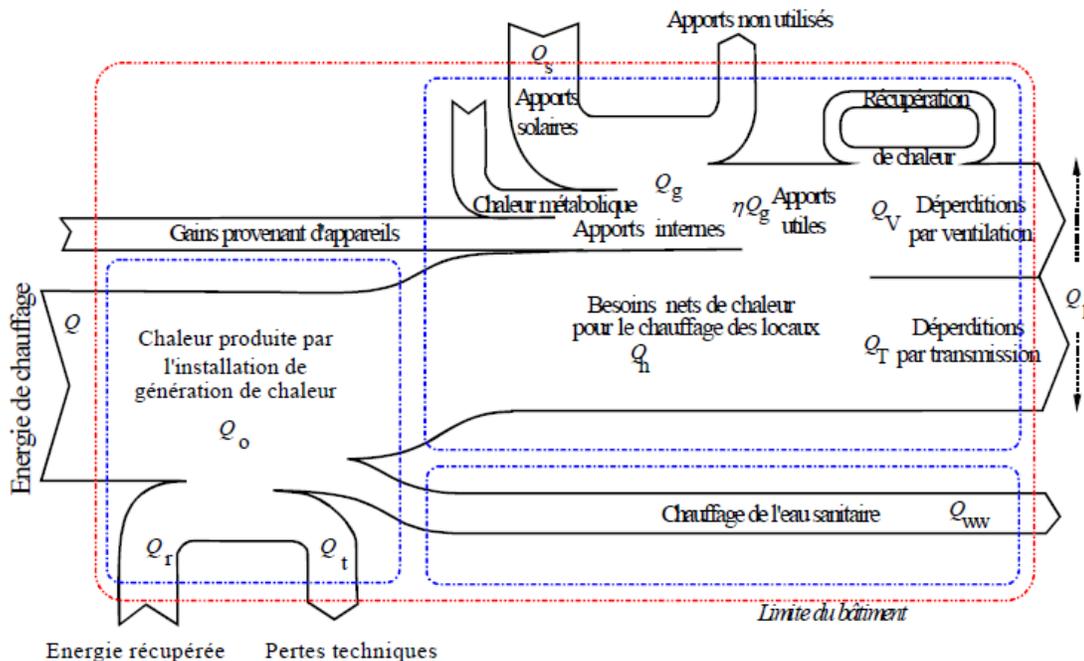


Figure 21 : Flux globaux d'énergie pour caractériser le besoin en chauffage [LAD-2013]

1.4.1 Déperditions

Les déperditions par l'enveloppe se situent au niveau du sol, des zones en contact direct avec l'extérieur, et par l'intermédiaire de zones non chauffées (Figure 22).

Les déperditions liées à une surface S peuvent s'exprimer en fonction de la différence entre les températures intérieures et extérieures (Equation 1.9) :

$$Q = H(T_{int} - T_{ext}) \quad (1.9)$$

- ⇒ T_{ext} : Température extérieure
- ⇒ T_{int} : Température intérieure
- ⇒ H : Coefficient de déperditions

$$H = H_T + H_V \quad (1.10)$$

- ⇒ H_V : Coefficient de déperditions par renouvellement d'air
- ⇒ H_T : Coefficient de déperditions par transmission à travers l'enveloppe

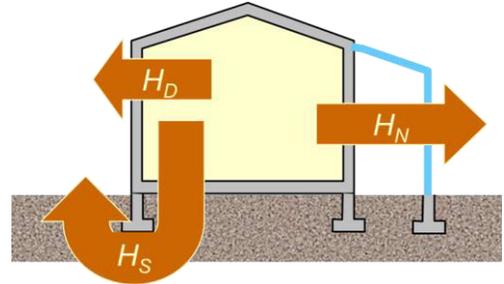


Figure 22 : Types de transmissions possibles des flux énergétiques

Le coefficient de déperditions par transmission H_T , se calcule par:

$$H_T = H_D + H_S + H_N \quad (1.11)$$

- ⇒ H_D : Transmission directe vers l'extérieur, à travers l'enveloppe du bâtiment
- ⇒ H_S : Déperditions par le sol
- ⇒ H_N : Déperditions à travers les espaces non chauffés

Les déperditions par ventilation dépendent de la masse d'air chauffé m_a , de la chaleur spécifique de l'air c_a et du rendement de récupération de chaleur sur l'air évacué η_r :

$$Q = m_a c_a (T_{int} - T_{ext})(1 - \eta_r) \quad (1.12)$$

- ⇒ m_a : Masse d'air chauffé
- ⇒ c_a : Chaleur spécifique de l'air, à savoir environ 1000 J/(kg·K)
- ⇒ η_r : Rendement de récupération de chaleur sur l'air évacué.

1.4.2 Etude des apports internes

Pour pouvoir calculer précisément les gains internes, il faut connaître les puissances dégagées par chaque apport. Les sources dissipent l'énergie de manière radiative et convective dans des proportions variables selon leur origine. Le gain de chaleur par rayonnement est partiellement absorbé par les parois et les objets environnants, mais n'affecte l'air de la pièce qu'après un certain temps [ASH-1997].

La part convective du gain de chaleur est transmise directement à l'air de la pièce par convection naturelle ou forcée sans retard. Les méthodes de calcul des besoins en chauffage se contentent de valeurs globales. Par exemple, dans les calculs réglementaires, ces apports sont évalués à 100 Wh par jour et m^2 de surface habitable [TEC-1998].

Gains dus aux occupants

Les gains de chaleur apportés par les personnes dépendent de la puissance dégagée par personne pour une surface donnée :

$$G_{Personnes} = p \frac{P h}{24} = A \frac{P h}{24D} \quad (1.13)$$

Avec

- ⇒ p : Nombre de personnes présentes dans la zone chauffée
- ⇒ P : Puissance dégagée par personne
- ⇒ h : Temps de présence par jour
- ⇒ A : Surface brute de plancher chauffé occupée par personne
- ⇒ D : Surface disponible par personne

Les normes SIA définissent des taux de présence différents selon les secteurs d'activité, qui, associées à une surface par personne, permettent de définir une énergie à partir d'une puissance spécifique. Pour un modèle de référence sans information sur le planning de production par exemple, on pourrait admettre une activité moyenne et classer les habitants en deux catégories: adultes et enfants. La norme SIA 380/1 propose les nombres présentés dans le tableau 1.

Secteur d'activité	Occupation (m2/personne)	Présence (heure/jour)	Puissance (Watt)
Logement collectif	40	12	70
Logement individuel	60	12	70
Bureau	20	6	80
Restaurant	5	4	70
Ecole	10	3	100

Tableau 1 : Puissance thermique dégagée par les habitants, norme SIA 380/1

Gains dus aux appareils

Il n'existe pas de méthode de calcul universelle pour calculer les apports internes apportés par les appareils. Dans [HOS-1998], les auteurs ont proposé d'utiliser un radiomètre scanneur pour mesurer la part radiante de la chaleur provenant des équipements des bureaux mais cette méthode dépend des conditions expérimentales (température de la pièce, mouvement de l'air, température des parois, variation de la température de la pièce, choix de la position et du nombre des points de mesure) et ne donne pas le total des gains internes provenant de ces appareils. [WIL-1991] ont mesuré la chaleur générée par les équipements des bureaux et ont comparé ces valeurs aux puissances données par le fabricant. Les études menées ont montré qu'il faut appliquer un facteur d'usage à la puissance donnée par le fabricant. Ce facteur varie entre 0.3 et 0.79. La valeur généralement utilisée est égale à 0.5, surtout pour les équipements dont le cycle nécessite le maintien d'une température constante.

$$P_a t(i) = P_a f_e t(i) \quad (1.14)$$

Gains solaires

Ces gains représentent la chaleur obtenue par transformation du rayonnement solaire entré par les menuiseries ou capté par des systèmes spécifiques passifs ne faisant pas partie de l'installation de chauffage. Dans le bâtiment, les surfaces de captage utilisées pour le chauffage solaire passif sont :

- ⇒ Les surfaces transparentes des fenêtres et portes
- ⇒ Le sol et les murs des serres et vérandas
- ⇒ Les parties opaques (façades, toiture), surtout si elles sont recouvertes d'une isolation transparente ou d'un vitrage (murs Trombe)

Les apports solaires dépendent de l'ensoleillement, de l'orientation des surfaces réceptrices, de l'ombrage permanent et des caractéristiques de transmission et d'absorption solaires des surfaces réceptrices. Pour une période de calcul donnée, les apports solaires s'obtiennent en sommant les apports de chaque surface de captage :

$$Q_s = \sum_j Q_{sj} \quad (1.15)$$

$$Q_s = \sum_j Q_{sj} = \sum_j I_{sj} \sum_n A_{snj} \quad (1.16)$$

où la première somme s'effectue sur toutes les orientations j , et la seconde sur toutes les surfaces n qui captent le rayonnement solaire, avec,

- ⇒ I_{sj} : Irradiance solaire, à savoir l'énergie totale, sur la période de calcul, du rayonnement solaire global incident sur une surface unitaire ayant l'orientation j
- ⇒ A_{snj} : Aire réceptrice équivalente de la surface n ayant l'orientation j

1.4.3 Modèles simplifiés

Modèles statiques

Ils étudient le comportement du bâtiment en régime permanent : la température intérieure est égale à la température de consigne et les sollicitations sont constantes dans le temps. Il y a équilibre thermique entre les échanges avec l'intérieur du bâtiment apportés par le chauffage et l'extérieur. Les modèles statistiques expriment la puissance appelée par le chauffage en fonction des données météorologiques donnés par l'équation du bilan thermique.

Dans une optique de simplification due à un manque de données, l'approximation de l'équilibre thermique consiste à considérer tous les apports calorifiques autres que le chauffage comme constants. L'équation se résume dans ce cas à :

$$Q t(i) = a + b (L (T_{int} - T_{ext}) t(i) \quad (1.17)$$

L'équation peut être simplifiée en considérant une température moyenne intérieure constante :

$$Q t(i) = \alpha + \beta T_{ext} t(i) \quad (1.18)$$

Les coefficients α et β sont estimés par régression linéaire à partir d'un nuage de points correspondant aux données journalières, hebdomadaires ou mensuelles collectées au niveau du bâtiment. Il est possible d'enrichir ce modèle en tenant compte des flux solaires donnés par la droite de régression linéaire :

$$Q t(i) = a + bT_{ext} + cI \quad (1.19)$$

Avec

- ⇒ Q : Puissance du système de chauffage,
- ⇒ I : Ensoleillement.
- ⇒ Les coefficients a, b et c sont calculés par la méthode de régression aux moindres carrés.

Modèles dynamiques

Ils permettent de prendre en compte le régime transitoire du bâtiment en fonction des sollicitations. Ils permettent à la fois de mieux caractériser le comportement énergétique du bâtiment et d'insérer l'humain à l'intérieur de ce bâtiment. Deux familles se distinguent : les modèles de signature énergétique et les modèles physiques.

Les modèles de signature énergétique introduisent la réponse du bâtiment aux différentes sollicitations

D'autres études utilisent des modèles réduits pour simplifier les modèles thermiques détaillés. Le bâtiment est modélisé par un circuit électrique équivalent simple (RC, R2C2, R3C2, R7C2) **[JAZ-2002]** **[ARB-2013]** pour modéliser le besoin en chauffage et refroidissement.

Pour les **modèles thermiques détaillés**, il s'agit d'étudier physiquement le comportement du bâtiment. Cette modélisation se base sur une connaissance parfaite du système et des différents scénarios d'utilisation et d'excitation. Un bilan énergétique est calculé heure par heure. Pour faire cette simulation, il faut rentrer dans le modèle les informations relatives à la physique du bâtiment :

- ⇒ le type de bâtiment (habitation, commerce, industrie)
- ⇒ le lieu géographique
- ⇒ l'orientation
- ⇒ les masques
- ⇒ la surface
- ⇒ les éléments de constructions
- ⇒ les menuiseries
- ⇒ les apports internes (personnes et équipements)
- ⇒ la perméabilité à l'air
- ⇒ les températures minimale et maximale de consigne (si besoin)
- ⇒ la limite maximale de puissance

Afin de pouvoir étudier quelle est la part de contribution énergétique des apports internes (occupants, puissance dissipée par les équipements électriques et solaires) sur une plus longue période

que précédemment, il est nécessaire de faire pour cela 5 simulations distinctes [IZA-2006]. Ces 5 simulations correspondent à un plan d'expérience où l'on appliquera le théorème de superposition. La méthode consiste à faire une simulation indépendante de chaque apport interne et d'étudier leur contribution par rapport à une simulation complète (Tableau 2).

Scénarios	Consigne de chauffage	Apports solaires	Apports occupants	Apports équipements électriques
Simulations sans apports	√			
Simulations apports solaires		√		
Simulations apports occupants			√	
Simulations apports électriques				√
Simulations tout apports	√	√	√	√

Tableau 2 : Plan d'expérience réalisé sur les différentes simulations de chauffage [IZA-2006]

Plusieurs logiciels permettent de faire ce type de bilan (bSol [BSO-2015], Pleiades COMFIE [PLE-2015], Objective-a [OBJ-2015]) en utilisant des schémas numériques stationnaires ou instationnaires. Contenu de la contrainte prédictive de notre étude, nous utiliserons les simulations thermiques dynamiques. En l'occurrence, notre choix s'est porté sur bSol et Pleiades COMFIE pour avoir des simulations horaires.

1.5 Le besoin en eau chaude sanitaire

Les sources d'énergie utilisées pour la production d'eau chaude sont la production instantanée par combustion (gaz, fioul domestique) avec une régulation de la température d'eau chaude contrôlée par le débit de gaz ou de production à accumulation thermique. Il s'agit alors d'un thermostat qui commande le fonctionnement du générateur. La consommation d'énergie pour l'eau chaude sanitaire est calculée à partir des besoins en énergie nécessaires pour fournir l'eau chaude au point de puisage divisés par le rendement du système. Les variables qui influencent le besoin en eau chaude sanitaire sont la fréquence d'utilisation en particulier dans l'habitat résidentiel et la température de consigne (généralement de 40°C pour un lavabo et de 60°C pour une machine à laver). Pour simplifier, certaines méthodes utilisent des valeurs basées sur des études statistiques qui dépendent du nombre d'occupants et de la surface de la zone chauffée [SAVE-2000].

Equipements par logement	Besoin énergétique (kWh/Jour)
1 évier	$1.3 + 0.3 * n$
1 évier + 1 lavabo	$2.5 + 0.9 * n$
1 évier + 1 lavabo + 1 douche	$3.5 + 0.9 * n$
1 évier + 1 lavabo + 1 petite baignoire	$2.0 + 1.3 * n$
1 évier + 1 lavabo + 1 grande baignoire	$3.8 + 1.3 * n$
1 évier + 1 lavabo + 1 grande baignoire +	$3.8 + 1.8 * n$

2^e cabinet de toilette

Tableau 3 : Besoin en eau chaude sanitaire selon le nombre d'équipements associé à un nombre de personnes n [ANG-2004]

1.6 Les usages spécifiques électriques

Nous nous attacherons à définir les appareils qui représentent la plus grande part dans la consommation énergétique du système. Dans le secteur résidentiel, le chauffage et l'eau chaude, en particulier sur les bâtiments les plus récents, représentent les plus gros consommateurs d'énergie.

L'objectif à partir de mesures au niveau du compteur global est de fournir **un outil de suivi de la consommation par usage** pour le consommateur final. Il permet également d'**augmenter la précision de la consommation électrique** en détectant par exemple les habitudes de consommation (par exemple, allumage de l'électroménager et du chauffage la nuit).

De plus, si le système d'étude permet un effacement du chauffage et de l'eau chaude, cela permet de **limiter le nombre de données en transit** et stockées. Seules des informations de pilotage de type ON-OFF seraient envoyées.

Les premiers travaux pour l'identification et la classification des équipements remontent aux années 80 par [HAR-1992]. Depuis, de nombreux papiers, thèses et brevets sont venus s'ajouter à ces travaux, montrant un grand intérêt à la fois de la communauté scientifique mais également des producteurs et fournisseurs d'électricité. Les principaux travaux menés sur la caractérisation des composantes constitutives de la consommation générale d'une installation électrique se font à partir de la courbe de charge générale (courant / tension / puissance).

Nous pouvons citer les travaux menés aux Etats-Unis (MIT (Massachusetts Institute of Technology), Université de Californie), en France (EDF-R & D) et au Canada (Université de Concordia). Les méthodes proposées se basent sur les travaux menés par George Hart dans les années 1980 qui a proposé certaines techniques de décodage en s'appuyant sur une modélisation par machines à états finis. Chaque appareil est modélisé par une machine à états, une recherche du plus court chemin permettant d'effectuer le décodage des événements. Pour classifier ces différents usages électriques, le travail du M.I.T [HAR-1992] propose une classification en fonction du profil de la courbe de charge individuelle de chaque appareil. Cette classification est la suivante :

- ⇒ Les usages à **consommation permanente** avec une puissance constante, 24 heures sur 24 et 7 jours sur 7 (Alarme incendie, Modem, Téléphone fixe).
- ⇒ Les **usages ON/OFF** : cette catégorie est constituée d'appareils possédant deux états seulement. Un état OFF où ils ne consomment pas, un état ON où ils consomment une puissance approximativement constante. De nombreux appareils courants dans le secteur résidentiel appartiennent à cette catégorie (bouilloire, ampoule électrique, réfrigérateur, congélateur, grille-pain, machine à café, micro-ondes, four, chauffage, eau chaude sanitaire).
- ⇒ Les usages à **nombre d'états fini** qui incluent les usages passant par plusieurs états distincts où ils consomment une puissance constante (machine à laver, sèche-linge, lave-vaisselle).

- ⇒ Les usages à **nombre d'états infini** : cette catégorie inclut les usages dont la puissance consommée peut varier continûment, en général en fonction d'un réglage utilisateur (les aspirateurs à puissance variable).

La méthode développée au M.I.T utilise la puissance active et la puissance réactive collectées à la seconde au niveau d'un point de mesure (Figure 23). La seconde est choisie pour limiter le risque de perte d'évènements liés à l'enclenchement ou l'arrêt de machine en simultanément. Cette méthode peut se résumer en cinq étapes :

- ⇒ Définition des différents évènements à partir de la puissance active
- ⇒ Classification à partir de deux variables : la puissance active et la puissance réactive
- ⇒ Regroupement des évènements ON/OFF par symétrie dans le plan puissance active/puissance réactive
- ⇒ Réduction du nombre d'évènements non classifiés
- ⇒ Association d'un nom à chaque usage identifié

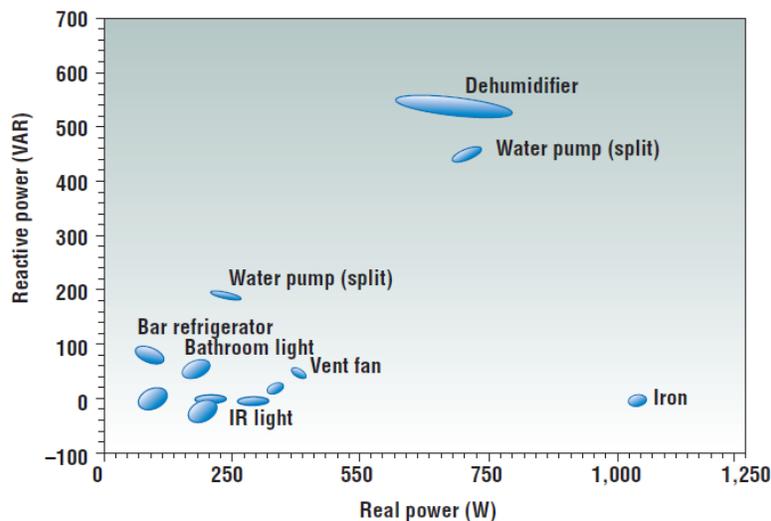


Figure 23 : Représentation des évènements détectés dans le plan Puissance Active en abscisse, Puissance Réactive en ordonnée pour une maison à gauche, deux maisons à droite, Etats Unis, [HAR-1992]

Dans [MAR-2000], l'auteur propose d'utiliser des connaissances a priori sur les durées moyenne et maximale de fonctionnement de chaque usage en combinaison avec un algorithme de détection de changements dans la puissance active ce qui permet de diminuer le taux d'erreur de l'algorithme de classification. Les travaux de [BAR-2004] proposent un algorithme identifiant les changements les plus fréquents puis construisant des machines à états finis hypothétiques à partir de ces changements. Cet algorithme présente des points communs avec celui du M.I.T, mais traite l'ensemble du problème de manière globale, ce qui permet de détecter conjointement les évènements ON et OFF d'un même

appareil, ou d'ignorer les changements peu fréquents pour se focaliser sur les contributions les plus importantes à la courbe de charge totale.

Dans [GUE-2009], une étude par charges est réalisée à partir de données à la seconde et permet de soutirer des informations a priori sur les appareils comme les puissances minimales ou maximales par appareils. Dernièrement, plusieurs auteurs se sont intéressés à la modélisation de courbes de charge par des chaînes de Markov cachées [PAR-2012], [KIM-2011].

Cependant, la généralisation du problème d'identification des appareils est complexe puisque les appareils et les habitudes de consommation diffèrent entre les maisons. Plusieurs campagnes de mesures basées sur des centaines de logements ont mis en lumière des facteurs allant de 1 à 20 pour la consommation énergétique d'un même appareil dans des logements différents [ENE-2004] [ADE-2010].

Si nous voulons fournir un outil non intrusif de désagrégation de courbe de charges, il nous faudra créer nos bases de données d'apprentissage d'appareils électriques. Si nous sommes à une fréquence d'échantillonnage d'une seconde, l'utilisation de la puissance active et réactive permet d'augmenter significativement la précision d'identification [DUF-2015].

Pour des raisons de données sur la puissance active et réactive, nous nous intéresserons dans cette étude à l'identification du chauffage et de l'eau chaude qui représentent à la fois le plus gros potentiel de flexibilité et la plus grande part de consommation dans le secteur résidentiel. Ces usages énergétiques sont fournis par une pompe à chaleur dans notre maison test. Il nous faudra ainsi créer une base de données pour cet appareil en collectant les puissances active et réactive à la seconde.

Pour permettre l'identification des appareils électriques avec comme point de mesure le compteur global, nous nous sommes basés sur nos propres campagnes de mesure et sur la base de données collectées par la HES-SO Fribourg [RID-2015].

1.7 Production local renouvelable

Energie solaire

Un des exemples d'utilisation de l'énergie solaire pour chauffer un bâtiment est d'utiliser des capteurs passifs. On va placer une vitre devant les murs pour chauffer l'air entre la vitre et le mur par convection naturelle (technique présente principalement aux Etats-Unis). Nous pouvons nommer les murs TROMBE [TRO-2015] (Figure 24).



Figure 24 : Types d'installations différentes de récupération du rayonnement solaire pour produire de la chaleur [TRO-2015]

Pour cette technologie, le marché est dominé à plus de 70% par la Chine. Les Etats-Unis, l'Allemagne et la Turquie avec chacune entre 3 et 5% de la part du marché global de l'électricité solaire pour chauffer le bâtiment. Au niveau mondial et dopé par la Chine, nous pouvons noter une augmentation de 400 % de la capacité thermique utilisée sur les 10 dernières années d'après l'agence internationale de l'énergie.

Dans un second point, nous pouvons citer les installations photovoltaïques qui sont majoritairement **installées sur le réseau basse tension**. Elles transforment le rayonnement solaire en électricité, soit en courant continu. Ce dernier est transformé en courant alternatif grâce à un onduleur, puis injecté dans le réseau public. Le photovoltaïque (PV) est une technologie-clé pour assurer un approvisionnement énergétique durable.

Aujourd'hui nous pouvons considérer les capteurs photovoltaïques (électricité) comme une technologie mature. Une des innovations aujourd'hui est portée par le couplage entre l'électricité et la chaleur avec des panneaux photovoltaïques et thermiques (Figure 25). Les capteurs peuvent être fixes ou suivre la course du soleil. Les cellules solaires sont refroidies par un fluide.

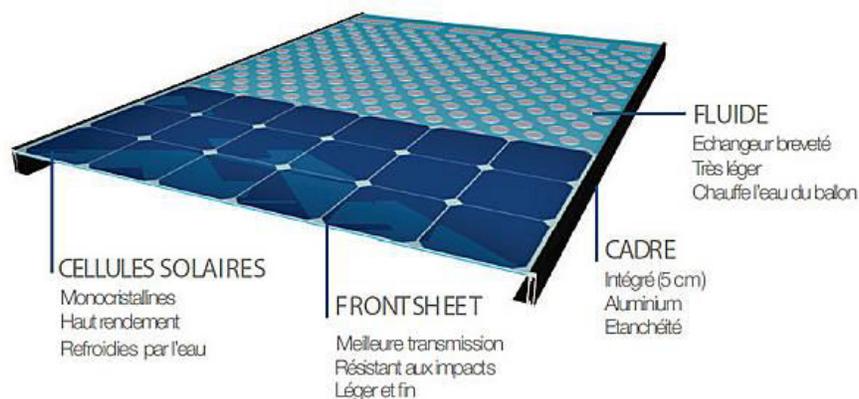


Figure 25 : Nouveau type de capteurs solaires qui intègre l'électricité et la chaleur [DUA-2014]

Pour les bâtiments individuels performants, la surface de captage est suffisante pour permettre une autonomie énergétique annuelle avec stockage de la chaleur (pour l'eau chaude sanitaire) et de l'électricité (stockage ou réseau électrique).

De nouveaux plans économiques rendent l'autoconsommation plus intéressante avec par exemple la diminution des prix des batteries électriques. Les freins au développement de l'énergie solaire locale restent une gestion optimale locale de l'offre et de la demande, une acquisition et le traitement en temps réel des données de consommations et de productions et des prévisions fiables à court terme.

Pour les réseaux électriques, il ne peut pas actuellement avoir plus de 30 % de sources de productions intermittentes mais il est possible de dépasser ce seuil à partir du stockage local d'après l'agence internationale de l'énergie.

Production d'électricité d'origine éolienne

L'intégration de systèmes éoliens dans le bâtiment est plus difficile que le photovoltaïque à cause de son exigence de régularité sur la vitesse du vent. Pour pallier aux variations de production, les éoliennes sont éloignées géographiquement mais sont présentes sur un même réseau qui, par effet de foisonnement, permettra d'assurer une plus grande régularité dans la production.

Dans le monde, en 2015, l'énergie éolienne a couvert 3% de la consommation d'électricité mondiale totale grâce à une puissance de 432'000 MW. [GWE-2015]. En Europe, fin 2015, la production continentale de l'énergie éolienne, correspondait à environ 11,4% de la consommation d'électricité totale [EWE-2015]. En Suisse, les 34 éoliennes installées totalisent 60 Mégawatts (MW) de puissance électrique et ont produit 110 mio. de kilowattheures (kWh) en 2015. C'est la consommation équivalente à 30'000 ménages suisses ou 0,2 % de la consommation d'électricité totale. En France on dénombrait 10'400 MW, en Allemagne 45'000 MW et en Italie 9'000 MW.

Le point faible de l'énergie solaire et de l'énergie éolienne est leur caractère intermittent et leur dépendance aux éléments météorologiques. Cela rend difficile leurs utilisations sans autre source d'énergie complémentaire ou sans un système de stockage, à moins d'avoir recours à un système de pilotage local innovant.

1.8 Stockage local de l'électricité

Les matériaux utilisés pour la construction du bâtiment possèdent une capacité thermique nommé **inertie thermique**. Le terme du stockage passif est introduit dans [HEN-2007] pour désigner la capacité d'accumuler de l'énergie sous forme thermique dans l'enveloppe du bâtiment. Les termes passifs et actifs sont également introduits. Le stockage thermique actif se trouve dans le système de production de l'eau chaude sanitaire ou le stockage de froid dans les systèmes de climatisation [HEN-2007]. Les bâtiments peuvent être ainsi séparés par leur inertie thermique. Cette inertie doit être prise en compte dans la mise en œuvre d'une régulation. Elle constitue une caractéristique physique du bâtiment.

Les batteries permettent le stockage de l'électricité pour les systèmes isolés et servent de conditionneur de puissance. La batterie peut permettre également de restituer la nuit le courant accumulé durant la journée. Par contre, les accumulateurs électriques sont généralement chers,

encombrants (environ 30kg pour 1kWh stocké) avec une durée de vie et un nombre de cycles associés encore faibles et posent des problèmes de pollution (métaux lourds) lors de leur fin de vie.

Nous pouvons cependant citer les nouvelles technologies de batterie sur la base de module Lithium Titanate Leclanché SRB1021 [LEC-2015] et les différentes applications réseau qui peuvent être réalisées et combinées avec une électronique de puissance pour contrôler les flux d'énergie.

1.9 Conclusion

Nous souhaitons un système de prédiction local. Pour réaliser un bilan, nous devons calculer les différents flux énergétiques à l'intérieur de notre système :

- ⇒ Déperditions par l'enveloppe et la ventilation
- ⇒ Gains internes solaires, des personnes et des appareils
- ⇒ Stockage
- ⇒ Production d'ECS
- ⇒ Usages spécifiques électriques utiles

Sur certains de ces points, nous pouvons évaluer assez précisément et en fonction du temps les quantités d'énergie échangées. Pour les autres (ECS, USE, gains internes, stockage), la bibliographie nous fournit des méthodes globales et indépendantes du temps. Il n'est donc pas possible à ce stade d'envisager une méthode correspondant au pas de temps souhaité.

Ceci impose la mise au point d'une méthode prédictive et apprenante dont nos modèles de simulation énergétique seront le point de référence. Il n'en reste pas moins que ces modèles permettent la compréhension du comportement énergétique du système.