

La Poutinière

Maison fonctionnant sans installation de chauffage et à énergie très positive



Bilan après un an de fonctionnement

Olivier SIDLER

Courriel : olivier.sidler@posteo.net

Janvier 2026 (V1)

Table des matières

Résumé	p. 4
Partie 1 : Généralités	p. 6
1 – Rappel du contexte du projet	p. 6
2 – Métrologie mise en place	p. 7
Partie 2 : Résultats de la campagne de mesure	p. 8
3 – Confort	p. 8
3-1 Températures intérieures	p. 8
3-1-1 Fréquences cumulées	p. 8
3-1-2 Impact de l'ensoleillement sur la température intérieure	p.11
3-2 Hygrométrie	p.13
3-3 Polygone de confort et confort adaptatif	p.14
3-3-1 Confort d'hiver	p.14
3-3-2 Confort d'été	p.16
3-4 Le gaz carbonique (CO2)	p.17
3-5 Température de l'air soufflé par la VMC	p.19
4 – Consommation d'électricité	p.24
4 - 1 Consommation globale annuelle et par usage	p.24
4 - 2 Saisonnalité des usages	p.25
4 - 3 Consommation de chauffage	p.26
4 - 4 Production d'eau chaude sanitaire	p.27
4-2-1 Consommation annuelle	p.27
4-2-2 Pertes de chaleur des ballons	p.27
4-5 Efficacité de l'échangeur de la ventilation double flux	p.29
5 – Puissances appelées	p.31
5 - 1 Fréquences cumulées	p.31
5 - 2 Puissance et consommation de veille	p.31
5 - 3 Eclairage centralisé	p.32
5 - 4 Ventilation mécanique double flux	p.33
5 - 5 Puissance maximum de chaque usage	p.35
5 - 6 Structure des 10 appels de puissance les plus élevés	p.35

6 – Production photovoltaïque	p.37
6 - 1 Production annuelle	p.37
6 - 2 Saisonnalité de la production	p.37
6 - 3 Fréquences cumulées de la production journalière	p.37
6 - 4 Fréquences cumulées de la puissance apparente maximum journalière	p.38
6 - 5 Production journalière au cours de l'année	p.38
6 - 6 Production hebdomadaire	p.39
7 – Couverture des besoins par la production photovoltaïque	p.40
7 - 1 Bilan annuel en énergie	p.40
7 - 2 Journées types	p.41
7 - 3 Bilan annuelle en puissance	p.44
7 - 4 Couverture des besoins en eau chaude sanitaire	p.44
7 - 5 Impact de l'ajout d'une batterie électrique sur le degré d'autonomie	p.46
8 – Les consommations d'eau	p.50
8 - 1 Consommations annuelles et mensuelles par point de puisage	p.50
8 - 2 Structure de la consommation annuelle	p.51
8 – 3 Saisonnalité au pas de temps du mois	p.53
8 - 4 Fréquences cumulées des volumes puisés à 10 minutes	p.55
9-Consommation du poste feux de cuisson	p.59
Conclusion	p.60

Résumé

Toute expérimentation doit faire l'objet d'une évaluation rigoureuse et transparente si elle a l'ambition de démontrer quelque chose. La construction de la Poutinière avait cette ambition en proposant une construction essentiellement à base de matériaux biosourcés, ou issus du recyclage, plutôt d'origine locale (paille, bois, terre crue), sans chauffage, sur des principes « Low Tech », comportant un pan de toiture recouvert de panneaux photovoltaïques, le tout pour le même prix que les villas HLM construites dans la région. La note technique décrivant les principes de la conception peut être téléchargée sur mon blog (<https://www.enertech.fr/la-poutiniere-maison-sans-chauffage-dossier-technique/>).

A cette fin près de 50 mesureurs ont suivi au pas de temps de 10' les températures, hygrométries, taux de CO₂, consommation des différents usages, production photovoltaïque, consommation d'eau par point de puisage, etc. Au total plus de 2,5 millions de mesures.

Il s'avère que pratiquement sans aucune consommation de chauffage (4,7 kWh seulement) la température moyenne dans les trois mois les plus froids a été de 20,2°C (voir la courbe des fréquences cumulées des températures au § 3-1-1). En été la température n'a jamais atteint 28°C au rez-de-chaussée et l'a dépassé pendant 75h à l'étage, mais les locataires disent avoir très bien passé les mois d'été. Les analyses conventionnelles au moyen des températures adaptatives (§ 3-3) confirment ce grand confort hiver comme été. On relèvera également les très faibles variations de la température intérieure les jours de canicule (1,2°C à l'étage et 2,3°C au RdC) attestant d'une excellente inertie thermique du bâtiment.

Grâce à la ventilation double flux avec récupération de chaleur qui équipe la maison, l'analyse de la concentration en CO₂ de l'air ambiant se révèle d'une excellente qualité (selon la norme européenne) 93% du temps au rez de chaussée et 80 % du temps à l'étage (voir fréquences cumulées au § 3-4). Mais cette ventilation contribue au confort puisqu'en moyenne la température de soufflage de l'air neuf n'est inférieure que de 2°C à la température ambiante (§ 3-5). En été cette température va même être jusqu'à 10°C inférieure à la température extérieure (qui aurait été celle de l'air neuf avec une ventilation naturelle ou une ventilation simple flux), démontrant ainsi qu'en été la ventilation double flux apporte un confort supplémentaire souvent inattendu. Quant à l'efficacité annuelle moyenne de l'échangeur récupérateur de chaleur elle est de 85,5%.

La consommation tous usages de l'électricité est de 1 863 kWh, dont 695 kWh pour la production d'eau chaude sanitaire (§ 4), ce qui est une valeur particulièrement basse malgré les pertes statiques considérables (45%) des deux ballons, pointant à nouveau la nécessité pour la profession d'améliorer l'isolation des chauffe-eau. Les besoins « au robinet » sont de 3,6 kWh/m²/an. Cette faible consommation est pour une part due aux dispositions mises en œuvre dans l'installation (proximité ballons/puisages, récupérateur de chaleur sur les eaux usées de la douche). Pendant la période (à partir du 25/3) où la charge du ballon principale a été autorisée seulement de 12 à 16h, la couverture solaire des besoins de ce ballon a été de 95%. Sur l'ensemble de l'année, et avec le non asservissement de la charge du ballon cuisine, la couverture solaire de l'ensemble des besoins d'ECS a été de 69%.

La consommation d'électricité de la ventilation double flux n'a été que de 267 kWh. Cette valeur est très sensible à l'encrassement des filtres. On a pu déterminer qu'il était nécessaire de

nettoyer les filtres tous les deux mois afin de limiter la surconsommation des ventilateurs et de maintenir un débit de renouvellement d'air suffisant (§ 5-4).

L'analyse de la structure des dix appels de puissance les plus importants met en évidence qu'il serait parfaitement possible de les supprimer tous en utilisant un délesteur (§ 5-6). Il serait même possible d'accroître très sensiblement la part de la consommation au moment de la production solaire.

La production photovoltaïque a été de 12 507 kWh, en baisse de 5% par rapport à l'année précédente. **Elle a donc été 6,7 fois supérieure à la consommation**, ce qui dépasse toutes les prévisions. Son facteur de charge est de 16,0% (§ 6). Toutefois, si on examine la simultanéité de la demande et de la production, seuls 1 125 kWh de consommation sont couverts par la production (60%), ce qui correspondrait à de la part d'autoconsommation.

La totalité des semaines de l'année présente une production supérieure à la consommation.

L'étude montre que si on voulait une autonomie totale (production et consommation égales en permanence) il faudrait associer une batterie de 29 kWh à l'installation (§ 7-5). Mais une batterie de seulement 11 kWh permettrait une autonomie de 97,6% conduisant à une sollicitation énergétique annuelle totale du réseau de seulement 45 kWh et à une puissance maximum de 2 kW.

Enfin, la consommation annuelle d'eau a été de 43,4 m³, soit 10,84 m³/pers/an, ou encore 32 l/j/pers. L'eau chaude sanitaire représente 23,7 % de cette consommation, soit 10,292 m³ à une température d'environ 50°C, soit encore 2,57 m³/pers/an ou encore 7,6 l/pers/j.

Le premier poste de consommation d'eau est les WC avec 34,1 %, suivi par l'ECS (23,7%) puis le lavage (16,0%).

Les feux de cuisson ont consommé 660 kWh et émis 178 kg de CO₂. On guette l'arrivée du biopropane.

Partie 1 : Généralités

1 – Rappel du contexte du projet

« La Poutinière » est une maison expérimentale visant à respecter toutes les exigences environnementales permettant d'inscrire la construction des bâtiments neufs dans une trajectoire compatible avec les limites planétaires à l'horizon 2050, ce qui conduirait notamment à contenir l'élévation de la température sur Terre à 1,5°C. Son nom est un pied de nez consécutif à la simultanéité du démarrage de sa construction avec le début de la guerre en Ukraine. Elle est située dans la Drôme, à Pont de Barret, en face des locaux du bureau d'étude Enertech. Elle est construite sur deux niveaux et sa surface habitable est de 106,26 m².

Sa conception a été décrite très en détail dans une note technique que l'on peut télécharger (<https://www.enertech.fr/la-poutiniere-maison-sans-chauffage-dossier-technique/>). Pour résumer, c'est une maison bâtie essentiellement en matériaux biosourcés (mur en paille et bois) ou issus du recyclage (ouate de cellulose), sans aucune installation de chauffage ni de climatisation, dotée de panneaux photovoltaïques sur son pan de toiture sud (puissance crête de 8,9 kWc), visant à offrir un confort sanitaire ayant par exemple conduit à adopter un régime de ventilation permanent de 0,72 vol/h, soit 190 m³/h. De nombreuses dispositions dans sa conception visent à réduire la consommation des usages courants. Elle ne comporte quasiment aucun automatisme et se veut la plus « low tech » possible. Elle fonctionne entièrement à l'électricité, hormis les feux de cuisson qui sont alimentés par du propane (bientôt du propane bio) afin d'éviter la puissance considérable des plaques à induction (10 kW maxi), la limitation des puissances appelées étant également un des objectifs assignés. Son coût de construction est le même que celui des villas HLM construites par le principal bailleur social ardéchois (Ardèche Habitat) : 1 859 € HT/m²hab sans les panneaux photovoltaïques et 1 992 € HT/m²hab avec.

La maison a été mise en location. Le loyer s'est voulu raisonnable et a été fixé à 900 €/mois (sachant qu'il n'y a en principe aucun frais de chauffage). Il y a pourtant eu peu de candidats pour occuper une maison sans chauffage avec de surcroît quelques contraintes supplémentaires (famille de 4 personnes, acceptation des mesureurs pendant deux ans, accueil des medias, etc) si bien que sur les 20 réponses reçues à l'annonce parue dans le Bon Coin, une fois éliminés les cas d'insolvabilité notoire, il n'est resté...qu'une seule famille. Il s'agit d'une famille « recomposée » dont la taille peut donc varier, selon les semaines, de 2 à 6 personnes en fonction des gardes alternées ce qui ne présente pas que des avantages en termes de suivi des consommations comme le montrera ce qui suit ! C'est aussi une famille qui n'est pas « écolo » selon ses dires et à qui la consigne a été donnée en entrant dans les locaux de vivre « comme elle en a l'habitude ».

Dernière précision : l'électricité produite par la toiture est intégralement vendue à EDF, ce qui a permis de réduire le loyer. Les locataires achètent le courant qu'ils consomment.

Enfin, malgré toutes les précautions de conception prises, on ne peut exclure les frasques de la météo et donc la nécessité d'un petit appoint de chauffage. On a donc mis à disposition de la famille un convecteur électrique mobile, en cas de nécessité.

2 – Métrologie mise en place

Un projet de cette nature n'a vraiment d'intérêt que s'il est instrumenté et fait l'objet d'un suivi minutieux. A défaut, comme on le voit trop souvent, chacun un peut affirmer ce qu'il veut de ses réalisations sans que l'on sache ce qu'il en est vraiment du confort et des consommations réelles. Faire un suivi permet en toute honnêteté de faire un bilan et de voir comment a fonctionné la réalisation par rapport à ce qui était prévu. Quel que soit le résultat, on apprend toujours quelque chose, et c'est d'autant plus intéressant de communiquer sur ses réussites mais aussi sur ses erreurs, ce qui évite aux autres de les refaire. Tous ensemble on progresse plus vite. C'est bien dans cet esprit critique qu'est présenté ce qui suit.

Deux campagnes de mesure d'une année seront faites. Ce rapport traite de la première. Elle s'étend du 1/1 au 31/12/2025. Toutes les mesures (hormis le PV fourni à 30' par Enedis) sans exception sont faites au pas de temps de dix minutes. Si bien qu'un point de mesure génère 52 560 données sur une année.

On suit la plupart des paramètres importants :

- Mesures des consommations électriques : 27 mesureurs ont été mis en place dans la maison, auxquels s'ajoute un comptage sur le PV. Tous les usages sont suivis.
- Un mesureur attaché à un petit convecteur électrique, au cas où les occupants éprouveraient le besoin d'un appoint thermique,
- Température, hygrométrie et concentration de CO2 sont suivies au rez de chaussée et à l'étage
- Températures entrée/sortie air neuf/air vicié de la ventilation double flux
- Compteurs d'eau : au nombre de 8 ils permettent de suivre tous les flux dans la maison :

Nom	Emplacement	DN	Nature du comptage
C1	Alimentation générale	20	Totalité eau consommée
C2	Alimentation LV	15	Conso LV
C3	Alimentation EF sous évier	15	Conso EF évier
C4	Alimentaion chauffe-eau évier	15	Conso EC évier
C5	Alimentation pt eau extérieur	15	Conso arrosage extérieur
C6	Alimentation du LL	15	Conso LL
C7	Alimentation des 2 WC	15	Conso WC
C8	Alimentaion EC salles d'eau	15	Conso EC salles d'eau

Tous les compteurs d'eau sont munis d'émetteurs d'impulsions. Le poids de l'impulsion est de 1 litre.

Au total ce sont donc 49 mesureurs qui ont été mis en place. L'instrumentation a été effectuée par Enertech.

L'ensemble des mesures est téléchargé toutes les 24h sur un serveur et un outil de visualisation permet un suivi graphique quotidien de tous ces paramètres, ce qui permet de repérer les pannes ponctuelles qui pourraient survenir au dispositif de mesure.

Partie 2 : Résultats de la campagne de mesure

3 – Confort

3-1 Températures intérieures

3-1-1 Fréquences cumulées

Le premier indicateur du confort est la température ambiante des locaux. On a distingué le rez-de-chaussée et l'étage de la maison. L'analyse est présentée à l'échelle de l'année, mais aussi par zoom sur la période hiver de [décembre à février] et la période été de [juin à septembre].

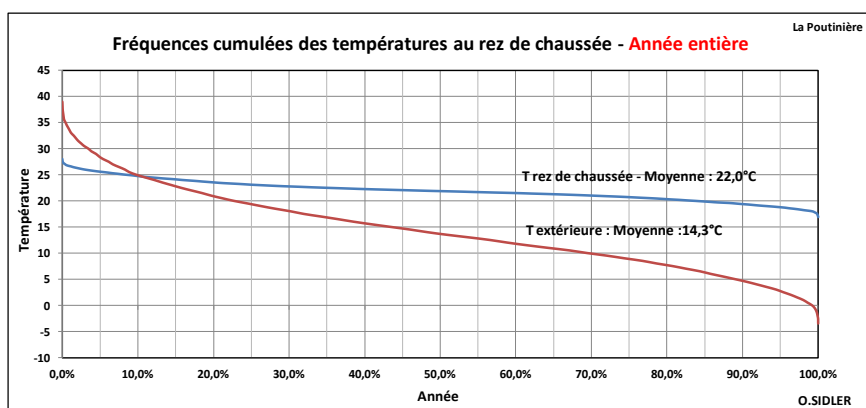


Figure 1 : Fréquences cumulées des températures ambiantes au rez-de-chaussée – Année entière

La température est extrêmement stable et varie « seulement » de 19 à 27°C tout au long de l'année. Elle est en moyenne de 22,0°C ce qui est remarquable. Pendant 10% de l'année la température est supérieure à 25°C (et inférieure à la température extérieure) et pendant 87,5% elle est supérieure à 20°C.

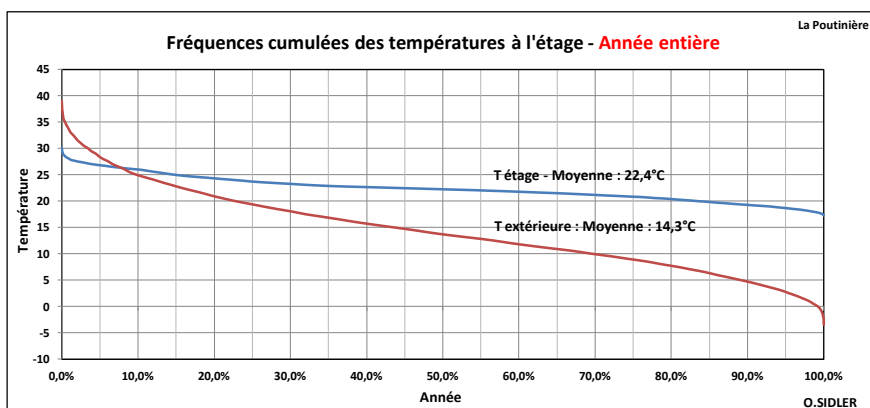


Figure 2 : Fréquences cumulées des températures ambiantes à l'étage – Année entière

A l'étage la plage de variation est un peu plus large, ce qui n'est pas étonnant : l'étage ne bénéficie pas en hiver des apports des personnes et des usages plutôt situés au RdC, et en été, malgré une très forte isolation de la toiture (50 cm de ouate de cellulose) et à cause d'une inertie thermique moins importante (pas de dalle basse lourde), la température varie un peu plus. A l'échelle de l'année elle passe de 18 à 30°. Pendant 15% de l'année la température est > 25°C et

pendant 85 % du temps elle est $> 20^{\circ}\text{C}$, sans aucun chauffage comme on le verra plus loin (voir § 4-3). A noter qu'elle est inférieure à la température extérieure pendant 7,5% du temps.

Les fréquences cumulées des températures en hiver et en été précisent ces tendances :

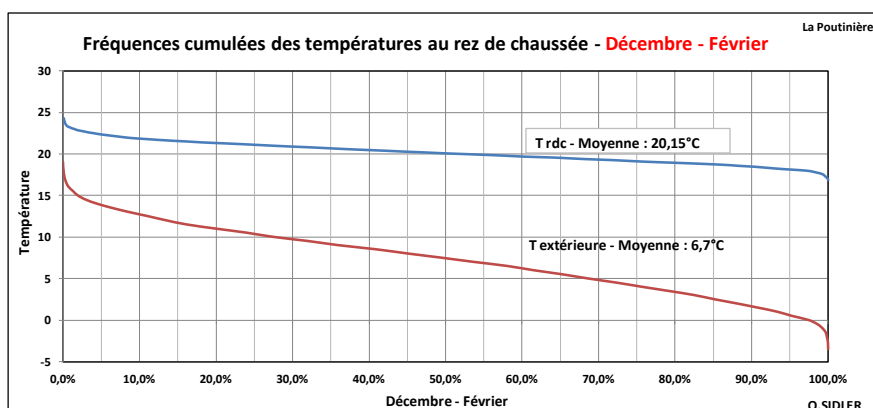


Figure 3 : Fréquences cumulées des températures ambiantes au rez-de-chaussée – [Décembre-Février]

En moyenne la température au RdC a été de $20,15^{\circ}\text{C}$ durant les mois d'hiver. Elle a été $> 19^{\circ}\text{C}$ pendant 79% du temps et il y a eu 43h (durant les nuits) pendant lesquelles la température a été $< 18^{\circ}\text{C}$ sans jamais être $< 17^{\circ}\text{C}$. Aux dires des locataires, le confort a été total à tout moment.

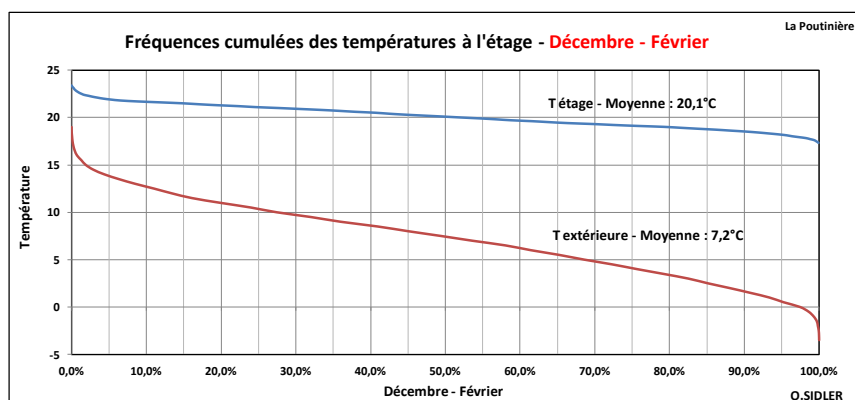


Figure 4 : Fréquences cumulées des températures ambiantes à l'étage – [Décembre-Février]

En moyenne la température à l'étage a été de $20,10^{\circ}\text{C}$ durant les mois d'hiver. Comme au RdC elle a été $> 19^{\circ}\text{C}$ pendant 79% du temps et il y a eu 52h (durant les nuits) pendant lesquelles la température a été $< 18^{\circ}\text{C}$ sans jamais être $< 17,3^{\circ}\text{C}$.

On peut être choqué que les températures dépassent 19°C puisque la réglementation l'interdit... Mais il s'agit ici d'un dépassement « gratuit », qui ne coûte ni en ressources planétaires ni aux finances de l'usager.... Ces mesures montrent, et la satisfaction des locataires le confirme, que le confort en hiver de cette maison est excellent et il y fait même globalement un peu plus chaud que dans des logements chauffés de manière traditionnelle.

L'été est une saison plus risquée dans des logements de ce type à cause de l'effet thermos d'une part (hyperisolation qui interdit de ressortir à tout apport de chaleur qui est entré), et des surfaces vitrées relativement importantes mises en œuvre au sud d'autre part. La simulation dynamique a quand même permis d'éviter les erreurs grossières en plafonnant ces surfaces et en montrant tout l'intérêt d'un ajout d'inertie thermique au moyen de briques de terre crue placées dans les planchers haut et bas de l'étage, et de l'installation de BSO (brise soleil orientable).

Suggestion a été faite aux locataires de se protéger de l'ensoleillement dès le matin au moyen des BSO et de maintenir les fenêtres fermées en journée (il fait plus chaud à l'extérieur) et plutôt ouvertes la nuit (s'il fait plus frais dehors).

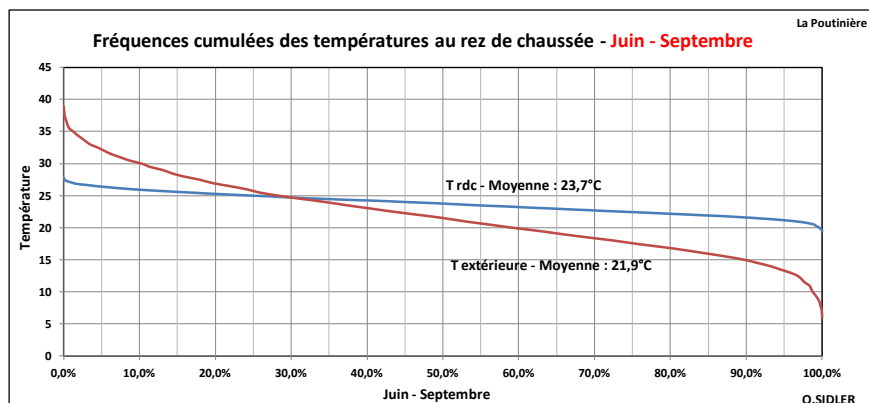


Figure 5 : Fréquences cumulées des températures ambiantes au rez-de-chaussée – [Juin-Septembre]

La température moyenne au RdC a été de 23,7°C durant les mois d'été. En pointe on a atteint 27,7°C pendant 2h et la température a dépassé 27°C pendant 24h. Rappelons qu'en conception on cherche à ce que dans cette période la température ne dépasse pas 28°C pendant plus de 40h. L'objectif est ici pleinement satisfait. A noter aussi que la température intérieure a été inférieure à la température extérieure pendant 30% du temps. La température la plus basse a été ponctuellement de 19,5°C.

La situation est moins bonne à l'étage pour les raisons évoquées précédemment. A ces raisons on peut aussi ajouter que, à certaines périodes des gardes alternées, la famille peut compter 6 personnes, et que dormir à 6 dans un espace réduit conduit à des apports de chaleur notables.

Toujours est-il qu'à R+1 la température moyenne est, en été, de 24,9°C (1,2°C de plus qu'au RdC). Elle a été inférieure à la température extérieure pendant 22% du temps et a connu un minimum de 21,5°C. Mais surtout, on a atteint 30°C pendant une heure, on a dépassé 29°C pendant 12h (soit 0,4% du temps) et 28°C pendant 75h (2,7% de la période estivale). Ce n'est pas très bon puisque c'est presque deux fois plus que les 40h que l'on ambitionnait. Pourtant la température extérieure n'a atteint ponctuellement « que » 38,9°C et n'a dépassé 35°C que pendant 33h. Il est donc à craindre qu'à l'avenir ces conditions intérieures extrêmes se durcissent. Mais il est vrai que ces périodes restent très courtes par rapport à toute la durée de la saison estivale et il est intéressant de noter que les locataires ont déclaré que l'été s'était très bien passé.

Il est également certain qu'avec une famille ne dépassant pas 4 personnes en permanence dans cette maison on n'aurait certainement pas connu des valeurs aussi élevées.

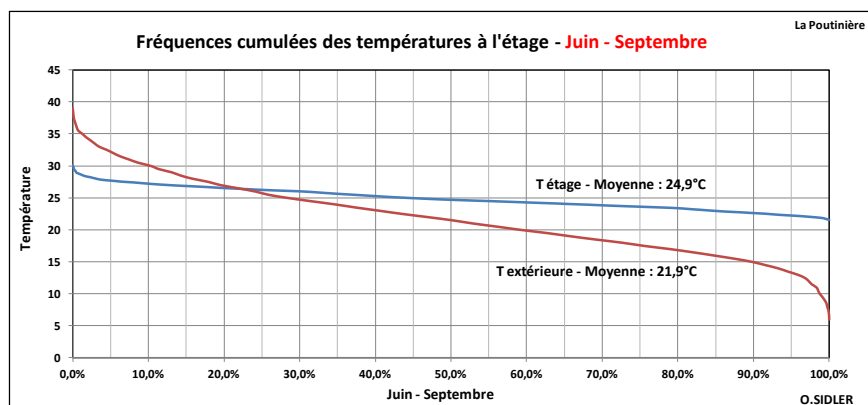


Figure 6 : Fréquences cumulées des températures ambiantes à l'étage – [Juin-Septembre]

3-1-2 Impact de l'ensoleillement sur la température intérieure

Il est intéressant d'observer l'évolution des températures intérieures en fonction de l'importance de l'ensoleillement dans cette maison à forte inertie. Pour cela on a retenu 3 journées du mois de janvier. La première, le 6, est la journée où les panneaux photovoltaïques ont la plus faible production du mois (donc le plus faible ensoleillement). Le 16 est celle de la valeur médiane de la production PV, et le 29 celle de la production maximum.

Pour la journée peu ensoleillée, on observe une lente chute des températures intérieures dans la nuit jusqu'à 19,3°C et une remontée difficile le matin jusqu'à l'arrivée d'un peu de soleil qui provoque assez vite une remontée de la température de 0,3°C au RdC où, à ce moment là, l'activité à l'intérieur du logement va provoquer une montée complémentaire aidée en cela par un ensoleillement plus franc en début d'après midi. Avec la fin de l'ensoleillement et de la présence (momentanée) dans le logement la température diminue de 0,25°C pour redécoller à partir de 19h....grâce au four qui va fonctionner pendant 1h50 et permettre une hausse de près de 0,5°C. On relève un déphasage constant d'une heure entre le moment où le soleil commence à percer et celui où la température commence à remonter, de même qu'entre le pic d'ensoleillement et le pic de température qui suit.

A l'étage le scénario n'est pas le même car les BSO n'ont été relevés qu'à 11h10 privant les pièces d'ensoleillement. On ne peut donc pas conclure grand-chose, si ce n'est que l'utilisation du four au RdC affecte avec un certain déphasage et une intensité moindre la température de l'étage.

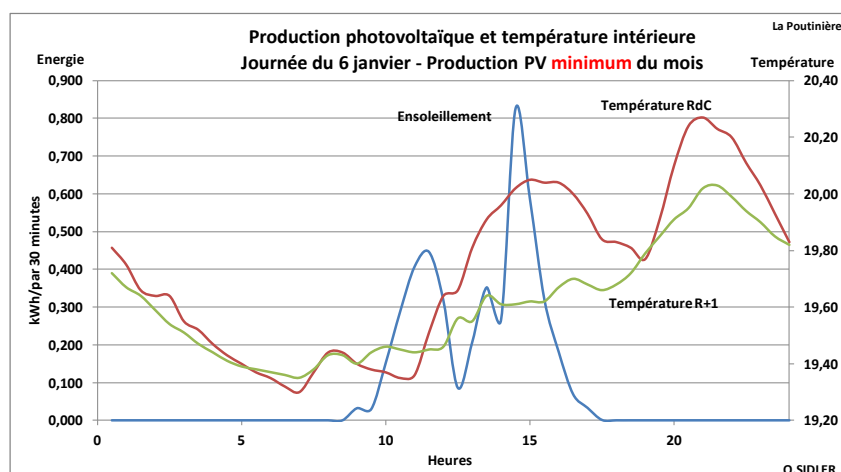


Figure 7 : Relation entre ensoleillement minimum (la production photovoltaïque) et les températures intérieures – Journée du 6 janvier

La journée du 16 janvier (voir figure 8) confirme ce déphasage d'une heure entre les variations de l'ensoleillement et celles des températures. Mais elle fait aussi apparaître le rôle majeur de l'inertie : les températures augmentent relativement vite dès que l'ensoleillement débute, celui-ci chauffant alors directement l'air des pièces en chauffant les surfaces de celles-ci. Mais quand le soleil décline, la décroissance des températures est plus lente que leur croissance car la chaleur a été emmagasinée dans les masses durant la journée, celles-ci restituant lentement ce qu'elles ont accumulé.

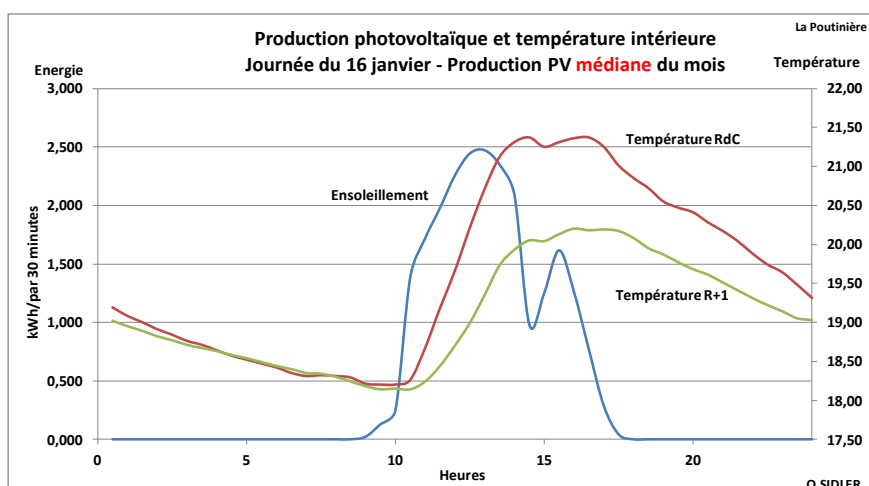


Figure 8 : Relation entre un ensoleillement médian (la production photovoltaïque) et les températures intérieures – Journée du 16 janvier

La journée très ensoleillée du 29 janvier confirme toutes ces observations.

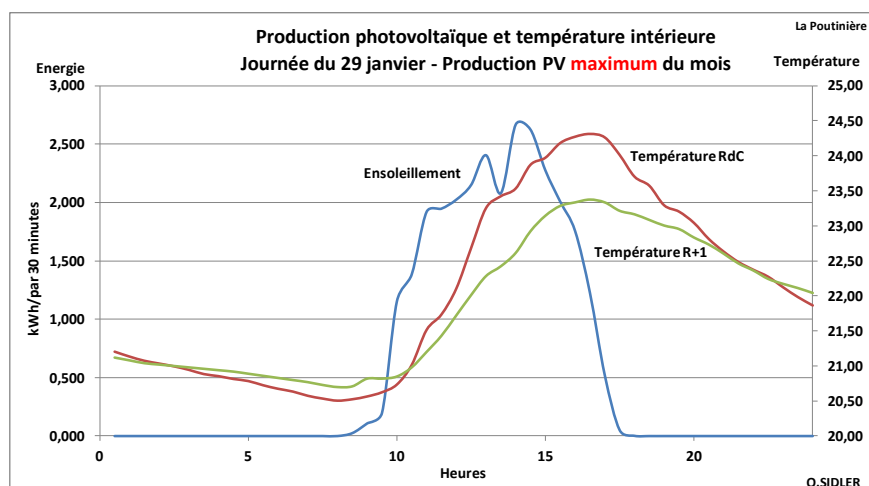


Figure 9 : Relation entre un ensoleillement maximum (la production photovoltaïque) et les températures intérieures – Journée du 29 janvier

L'évolution des températures durant une semaine assez bien ensoleillée de janvier montre les variations quotidiennes relativement importantes de la température intérieure :

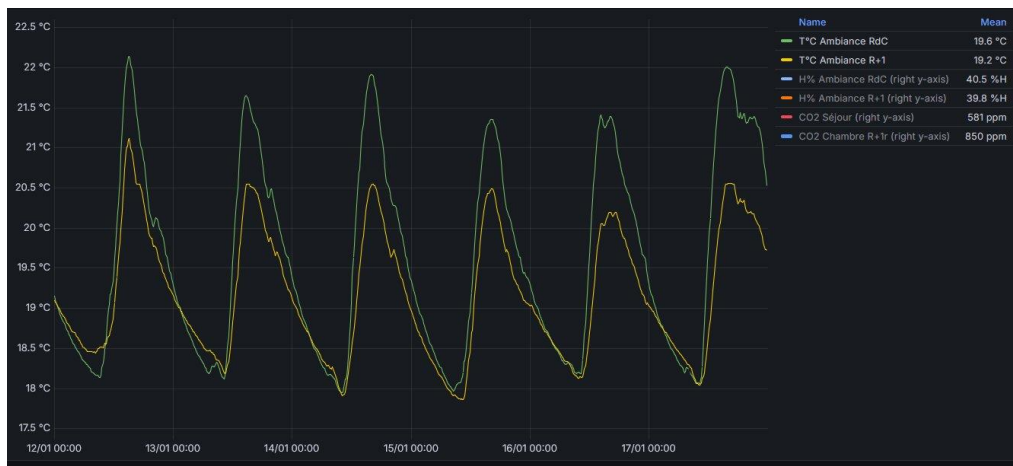


Figure 10 : Evolution de la température intérieure au RdC et à R+1 du 12 au 17 janvier 2025

Ces variations sont de 4°C au RdC et de 2,5°C à l'étage. Ceci est une caractéristique forte des logements fonctionnant à l'énergie solaire, par opposition aux logements chauffés de façon traditionnelle dans lesquels la régulation pilote la constance de la température intérieure.

3-2 Hygrométrie

L'hygrométrie est le second paramètre caractéristique du confort, surtout lorsqu'il est couplé avec la température (voir §3-3). Ce qui suit se contente de présenter les fréquences cumulées de l'hygrométrie pour l'année entière, l'hiver et l'été.

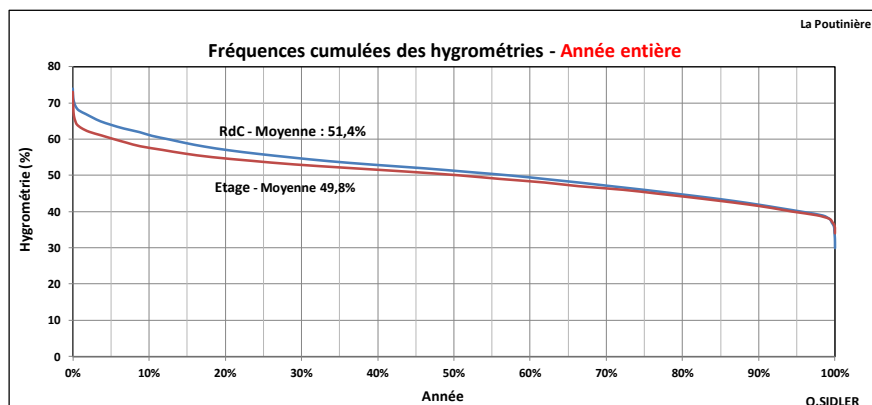


Figure 11 : Fréquences cumulées des hygrométries au RdC et à l'étage – [Année entière]

L'hygrométrie varie de 35 à 65% pour l'étage et à 70 % pour le RdC. C'est bien sûr en hiver (moyenne d'environ 45%) qu'on observe les valeurs les plus faibles et en été les plus élevées (moyenne 56%).

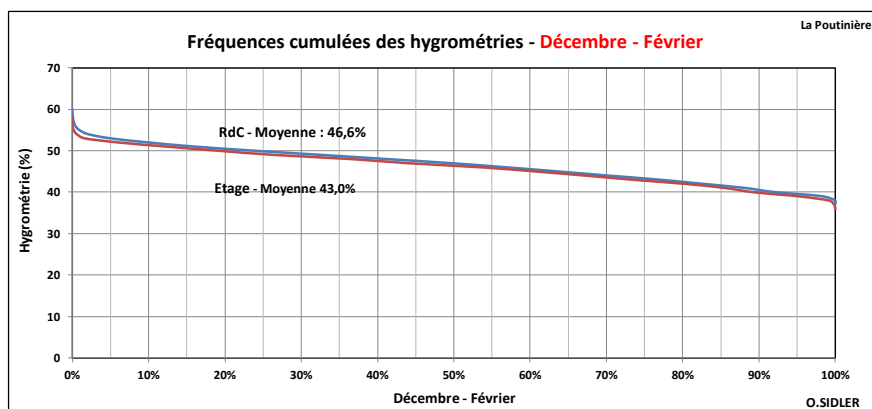


Figure 12 : Fréquences cumulées des hygrométries au RdC et à l'étage – [Décembre-Février]

On constate qu'il n'y a pratiquement pas de différence de valeur de l'hygrométrie entre les deux niveaux de l'habitation....

On entend souvent dire que la ventilation double flux dessèche l'air. Ca ne lui est pas spécifique : tout système de ventilation, qu'il récupère ou non la chaleur de l'air extrait, qu'il soit naturel ou mécanique, introduit dans le logement en hiver un air très sec, ce qui permet d'éliminer la vapeur présente dans le logement, évitant ainsi qu'elle se condense sur les points froids en générant des moisissures. Ce faisant elle diminue effectivement l'hygrométrie intérieure, mais c'est bien l'objectif recherché lorsqu'on veut éliminer la vapeur d'eau d'un logement !

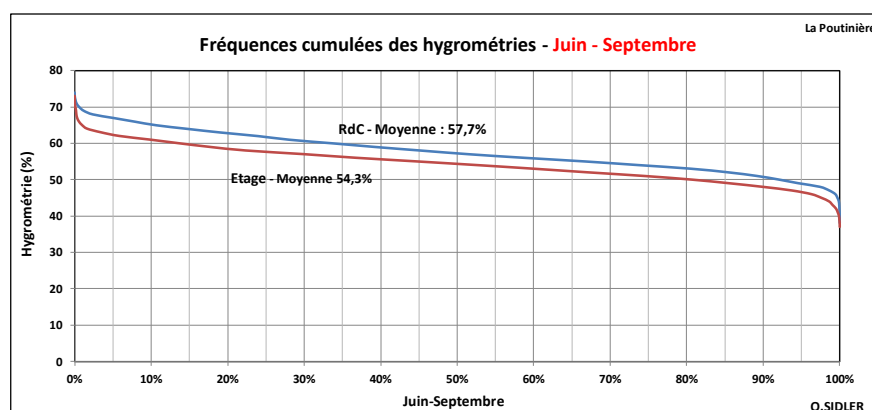


Figure 13 : Fréquences cumulées des hygrométries au RdC et à l'étage – [Juin-Septembre]

3-3 Polygone de confort et confort adaptatif

La caractérisation du confort est beaucoup plus intéressante lorsqu'on associe température et hygrométrie.

3-3-1 Confort d'hiver

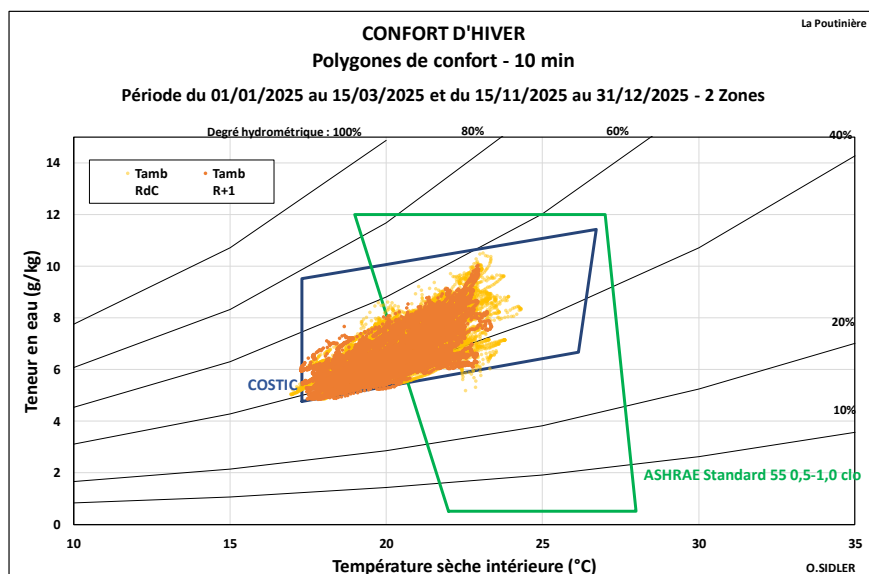


Figure 14 : Confort d'hiver – Polygones de confort

Le graphique de la figure 14 présente l'évaluation du confort selon la méthode des polygones inscrits sur le diagramme de l'air humide. Les polygones proposés par le COSTIC (Centre d'Etudes et de Formation Génie Climatique Equipement Technique du Bâtiment) et l'ASHRAE (American Society of Heating, Refrigerating and Air-Conditioning Engineers) servent de référence. Il s'agit d'une approche qui a maintenant près d'un demi-siècle et qui a certainement assez vieilli. La notion de confort a beaucoup évolué depuis. Mais ces polygones ont le mérite d'exister. Le nuage de points est l'ensemble des couples (humidité spécifique/température intérieure) observés en valeur moyenne horaire dans le logement. Il est clair que la notion de confort est relative, et ces deux polygones le montrent bien.... Le grand spécialiste du confort, le Danois O.Fanger, définissait les conditions de confort comme celles satisfaisant 80% des membres d'un échantillon....

Si on se fie au polygone du COSTIC, on observe qu'en hiver, sans aucun chauffage, le confort est excellent puisque tous les points sont à l'intérieur du polygone de confort. Curieusement, pour l'ASHRAE toute température intérieure inférieure à 20,5 ou 21°C est jugée insuffisante (ce qui n'a plus aucun sens dans une construction très fortement isolée où les murs ont une température de surface élevée). Seules les périodes où la température est supérieure sont considérées comme confortables, ce qui est quand même le cas pendant 40% du temps. Soit dit en passant, l'ASHRAE signifie à la France que sa réglementation à 19°C place tous les logements (et la majorité des locaux tertiaires) en situation d'inconfort....

L'approche adaptative, qui intègre un critère d'adaptation des usagers à la température extérieure, permet d'affiner l'approche du confort en admettant que la température de confort peut évoluer en fonction de la température extérieure. La norme NF 15 251 part du principe que le confort des usagers pour la température ambiante dépend d'une part de la température extérieure, d'autre part de son *historique*, dans le sens où l'on supporte mieux des températures élevées si la chaleur dure depuis quelques jours plutôt que si elle survient brutalement.

Pour ce faire on trace la température intérieure en fonction de la *température extérieure journalière pondérée par celles des jours précédents*.

La NF 15 251 définit ensuite 4 catégories de confort :

Catégorie	Description
I	Niveau élevé attendu qui est recommandé pour les espaces occupés par des personnes très sensibles et fragiles avec des exigences spécifiques comme des personnes handicapées, malades, de très jeunes enfants et des personnes âgées.
II	Niveau normal attendu qu'il convient d'utiliser pour les bâtiments neufs et les rénovations.
III	Niveau modéré acceptable attendu qui peut être utilisé dans les bâtiments existants.
IV	Valeurs en dehors des critères des catégories ci-dessus. Il convient que cette catégorie soit acceptée seulement pour une partie restreinte de l'année.

Seules les 3 premières catégories ont été nécessaires ici :

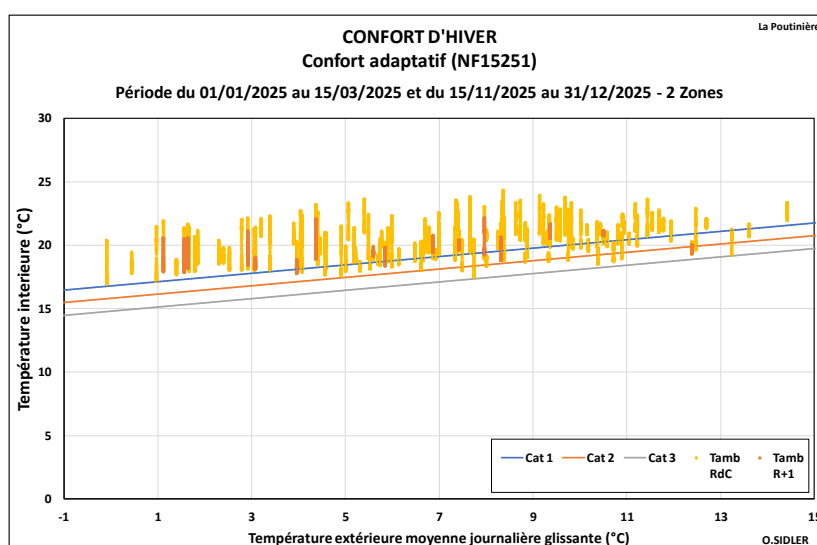


Figure 15 : Confort adaptatif d'hiver

La température intérieure est très majoritairement plus élevée que les critères de la catégorie 1. Dans tous les autres cas la température est meilleure que la catégorie 3 et satisfait très majoritairement la catégorie 2. Cette approche confirme que **le confort en hiver est excellent dans la maison**. Les locataires confirment en affirmant qu'ils n'envisagent pas de vivre un jour ailleurs que dans cette maison (sic). On retiendra donc que **sans chauffage** (et même si un peu de chauffage était nécessaire une autre année) **il est possible d'offrir dans une maison un confort hivernal sans faille**. Et qu'on ne s'y trompe pas. Certes la Drôme est relativement bien ensoleillée la plupart du temps en hiver, mais il y fait plutôt très froid dans la zone des Préalpes....

3-3-2 Confort d'été

Aucun des deux polygones proposés (voir figure 16) considère qu'au-delà de 28°C, et quel que soit le degré hygrométrique, on peut parler de confort. Comme précisé précédemment, ces polygones ont été proposés il y a déjà plusieurs décennies et depuis les conditions climatiques estivales se sont fortement dégradées sur Terre.

Toujours est-il que, selon ces critères, le confort estival n'est atteint qu'environ 50 ou 60% du temps. C'est peu. Il faut remarquer que le degré hygrométrique est jugé excessif dans de nombreuses configurations. Or avec le fort débit de ventilation en place la majeure partie de l'humidité produite dans cette maison est éliminée si bien que le degré hygrométrique intérieur est principalement imposé par l'air extérieur. Et dans ce cas, seule la climatisation est susceptible d'apporter une solution. Mais cette approche est hors de notre propos dans cette maison...

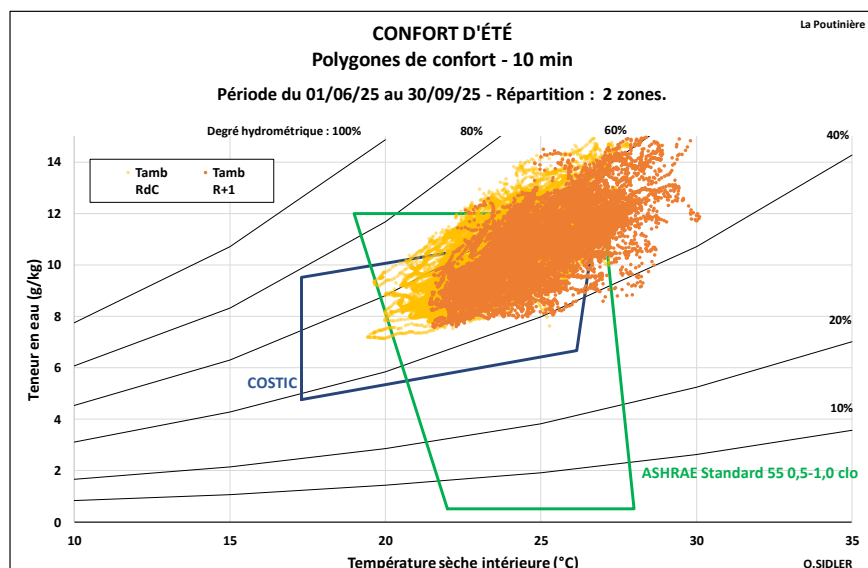


Figure 16 : Confort d'été – Polygones de confort

A nouveau l'analyse du confort adaptatif apporte une réponse plus fine et plus réaliste, basée sur des études récentes des conditions effectives du confort l'été.

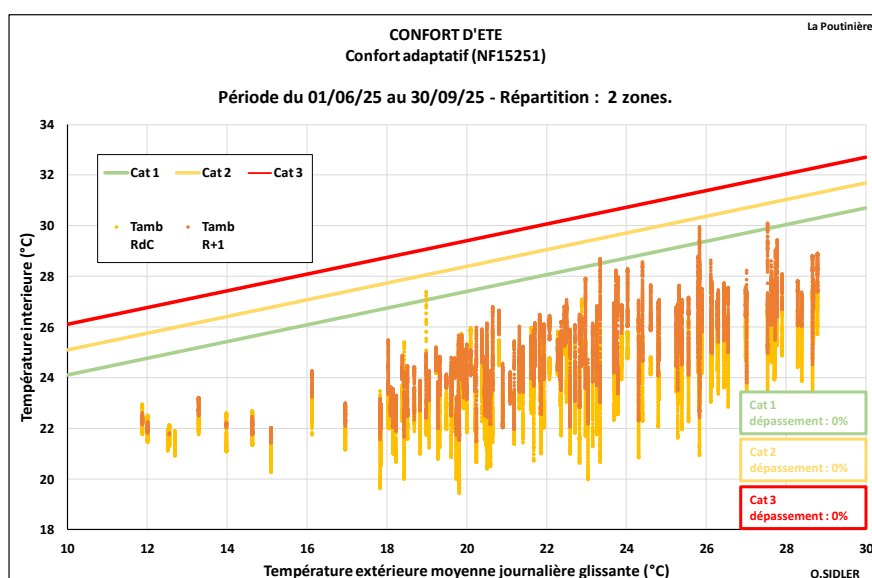


Figure 17 : Confort adaptatif d'été

Quasiment toutes les températures sont meilleures (donc plus basses) que les valeurs définies par le cas 1, le plus contraignant. Selon cette analyse le confort estival est donc de grande qualité. C'est cette seconde analyse, plus fine et plus sophistiquée, qu'on retiendra pour caractériser le confort d'été dans cette maison. Et accessoirement à nouveau l'avis des locataires qui se sont dits pleinement satisfaits du confort cet été.

3-4 Le gaz carbonique (CO2)

La concentration de l'air en gaz carbonique est le premier indicateur de la qualité de l'air d'un logement, même si ce gaz n'est pas en soi un polluant (la dose létale est de 40 à 80 000 ppm selon les sources). On connaît son origine (la présence humaine) et la solution du problème (la ventilation). Certains pensent, à tort, que pour faire des économies d'énergie (car le renouvellement d'air coûte

énergétiquement très cher) il suffit dès lors de ne ventiler qu'en présence des personnes, comme le propose la ventilation hygroréglable dont toutes les campagnes de mesure faites par Enertech ont montré qu'elle était incapable de faire varier le débit de plus de 2% en cours de journée....

Mais ce serait réduire la pollution de l'air intérieur au seul CO₂ ! Malheureusement d'autres composants sont de plus en plus souvent présents, comme le formaldéhyde. Ils émanent des matériaux de construction et d'ameublement. Dans une maison où le bois est très présent, le formaldéhyde peut atteindre des concentrations dépassant largement les 30 µg/m³. La seule solution sérieuse est la ventilation mécanique permanente (car elle maintiendra un débit constant en toute circonstance) avec un débit d'au moins 0,6 vol/h et, pour éviter une explosion de la charge énergétique due à ce renouvellement d'air, la mise en place d'une VMC double flux avec récupération de chaleur. La pollution par les matériaux de construction est permanente, ce qui impose que le débit de ventilation le soit aussi, ce que seuls les systèmes mécaniques sont capables de garantir. C'est ce qui a été fait dans cette maison.

Faute de moyens, seule la concentration de CO₂ a été mesurée en continu ici....

La norme européenne EN 13 779 définit différents niveaux de qualité pour l'air intérieur :

Catégorie	Description	Concentration en CO ₂ : niveau en plus de l'air neuf (ppm)
IDA1	Excellente qualité	≤ 400
IDA2	Qualité moyenne	400 - 600
IDA3	Qualité modérée	600 - 1000
IDA4	Faible qualité	> 1000

Figure 18 : Classification de la qualité de l'air intérieur (norme EN 13 779)

Les niveaux donnés dans le tableau sont exprimés **en valeur relative**, par rapport au niveau de concentration de l'air extérieur. Cette dernière n'ayant pas été mesurée, on retiendra comme valeur la moyenne des concentrations les plus faibles observées pendant 1% de la période de mesures, soit 441 ppm au RdC et 442 ppm à l'étage qu'on arrondira à 440 ppm.

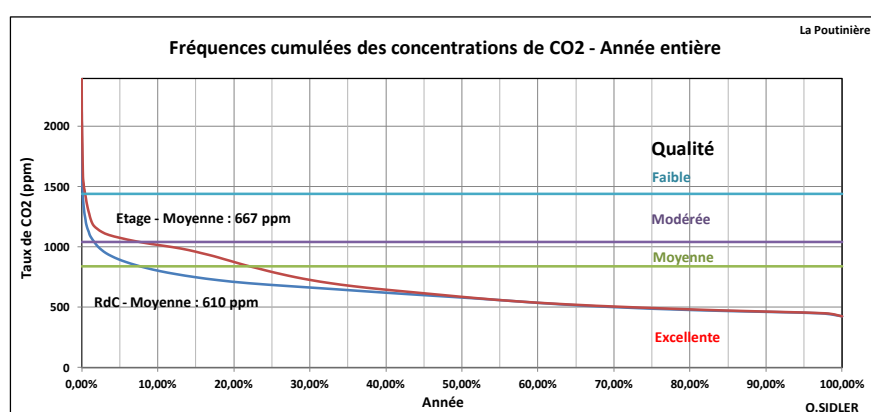


Figure 19 : Fréquences cumulées des concentrations en CO₂ au RdC et à l'étage – [Année entière]

L'expression des valeurs moyennes sur le graphique doit être corrigée si l'on veut les mêmes références que la réglementation européenne : ainsi, **la moyenne au RdC (de CO₂ au-dessus de sa valeur extérieure) est de 170 ppm, et de 227 ppm à l'étage**. Globalement on est donc en moyenne dans une qualité très majoritairement excellente. En examinant de plus près la fréquence des différents états de la qualité de l'air voici ce qu'on observe :

Qualité	RdC	Etage
Excellente	8 136 h 92,90%	6 978 h 79,70%
Moyenne	487 h 5,60%	1 204 h 13,70%
Modérée	125 h 1,40%	542 h 6,20%
Faible	12h 0,14%	36 h 4,10%

Figure 20 : Durées annuelles des différents états de la qualité de l'air

Globalement ces résultats sont excellents et attestent de l'intérêt d'une ventilation mécanique assurant un débit permanent de renouvellement d'air. Mais il est clair qu'un système dimensionné *a priori* pour 4 personnes présente des faiblesses lorsqu'il y a 6 occupants comme c'est le cas ici. Et que dire du jour où, pour fêter un anniversaire, 20 gamins se sont retrouvés dans cette maison, faisant exploser le taux de concentration à plus de 2 000 ppm !

3-5 Température de l'air soufflé par la VMC

Tout le monde s'accorde sur la nécessité de ventiler correctement les logements, ce qui conduit à des critères variés mais indiquant tous qu'à un moment ou à un autre le débit d'air devra se situer entre 0,6 et 1,0 vol/h. Mais immanquablement, l'expérience montre que dès lors que la ventilation est soit naturelle soit simple flux, les usagers obstruent systématiquement les entrées d'air et peuvent même dans certains cas (comme on l'a vu) recouvrir la bouche avec le papier peint, pour la simple raison que le flux d'air entrant est trop froid et crée une gêne.



Figure 21 : Exemple de grille de ventilation naturelle cachée par le papier peint

Il est dès lors intéressant de voir comment évolue la température de soufflage d'une installation double flux avec récupération de chaleur.

La courbe des fréquences cumulées à l'échelle de l'année montre qu'en moyenne la température de soufflage est de 21,25°C, alors que la moyenne de la température extérieure a été de 14,3°C.

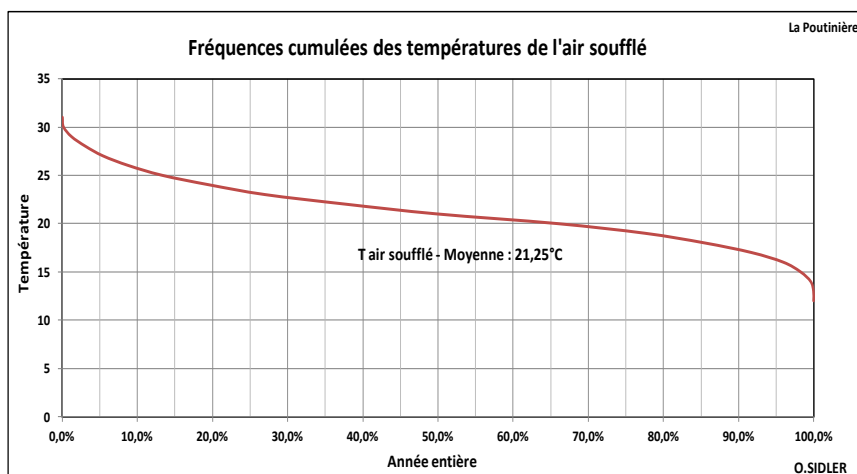


Figure 22 : Fréquences cumulées des températures de l'air soufflé – [Année entière]

Mais aux extrêmes cette température passe de 13 à 30°C. Il est donc intéressant d'analyser séparément les périodes d'hiver et d'été.

En hiver la température moyenne du soufflage est de 18,2°C alors que sur la même période la température extérieure moyenne est de 7,2°C. On voit par là l'importance sur le confort introduite par la récupération de chaleur. Les locataires parlent d'un « cocon de bien-être avec de l'air agréable à respirer et aucune humidité ».

Durant cette même période, la température minimale de l'air soufflé est de 13°C et sa température maximale de 23°C.

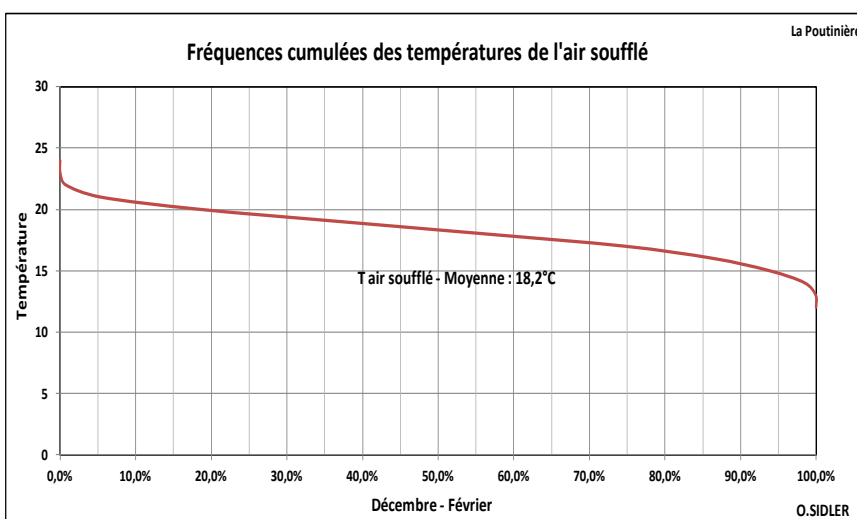


Figure 23 : Fréquences cumulées des températures de l'air soufflé – [Décembre-Février]

On précise l'intérêt de cette solution technique en analysant les fréquences cumulées de l'écart de température d'air ambiant et d'air soufflé, en hiver :

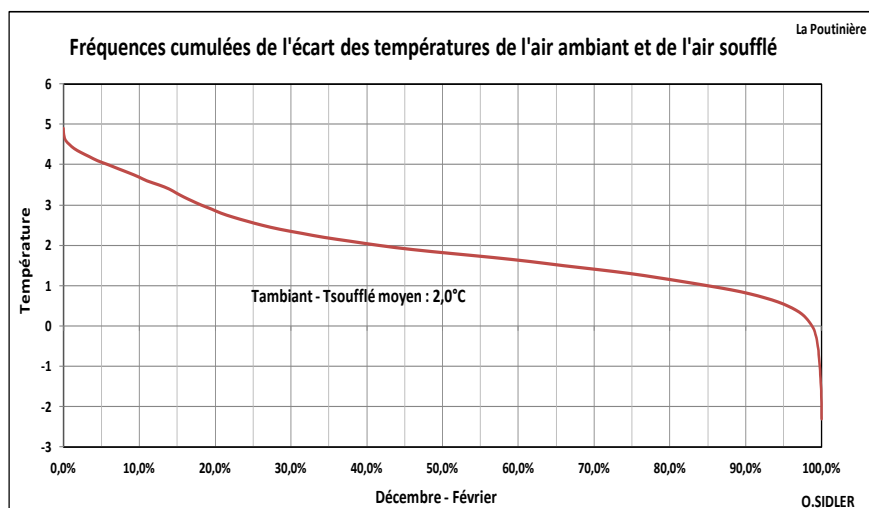


Figure 24 : Fréquences cumulées des écarts de température de l'air ambiant et de l'air soufflé
[Décembre-Février]

Ce graphique montre pourquoi, à tout instant de l'hiver, l'introduction d'air neuf ne crée aucun inconfort pour l'occupant : en moyenne la température de l'air soufflé n'est inférieure que de 2°C à la température de l'air ambiant. Et dans le pire des cas cet écart ne dépasse pas 4,5°C ! Il peut même arriver que dans 1% du temps la température de l'air soufflé soit supérieure à la température ambiante.

Ce qui se passe en été est peut-être encore plus intéressant, car relativement inattendu pour beaucoup de monde....

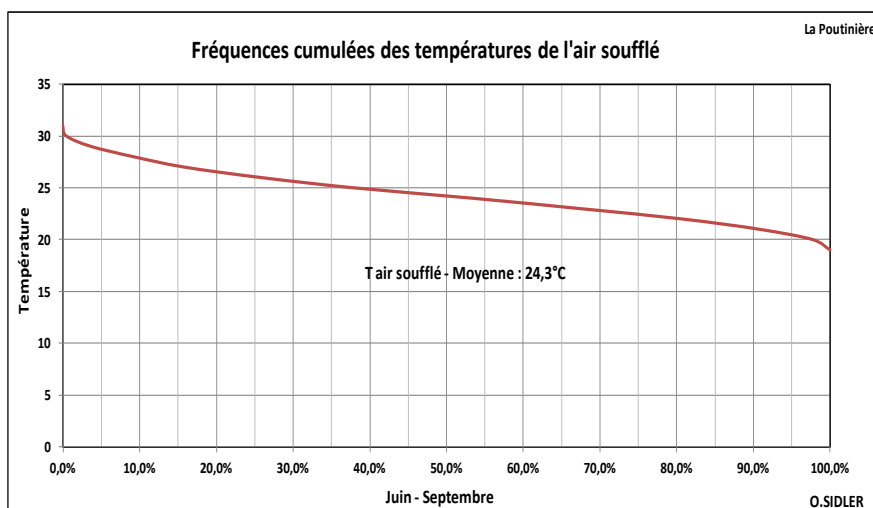


Figure 25 : Fréquences cumulées des températures de l'air soufflé – [Juin-Septembre]

Pendant près de 40% du temps la température de l'air soufflé est supérieure à 25°C. Sur tout l'été la température moyenne est de 24,3°C. A minima cette température est de 19,0°C et a maxima de 30,9°C. Ces valeurs sont élevées. Sont-elles légitimes et ont-elles une explication ?

Si on examine les fréquences cumulées de l'écart des températures d'air ambiant et d'air soufflé on découvre que pendant 57,5% du temps en été la température de soufflage est supérieure à la température de l'air ambiant. Donc que l'air soufflé réchauffe le logement :

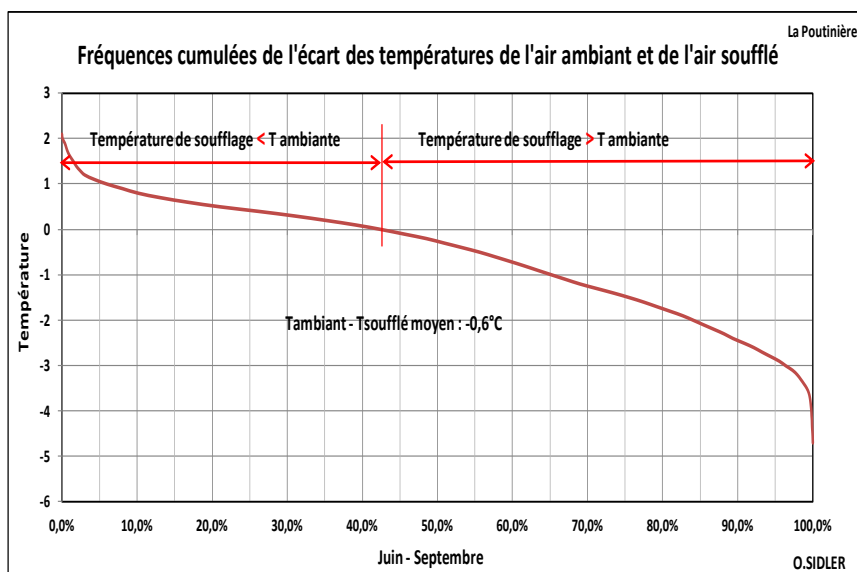


Figure 26 : Fréquences cumulées des écarts de température de l'air ambiant et de l'air soufflé
[Juin-Septembre]

Ce n'est pas le but recherché. S'agirait-il d'un inconvénient majeur des installations double flux ? Pour mieux comprendre il faut analyser ce qu'il se passe, par exemple le 12/8/2025, journée pendant laquelle la température de soufflage a atteint la valeur de 30,9°C la plus élevée de toute l'année.

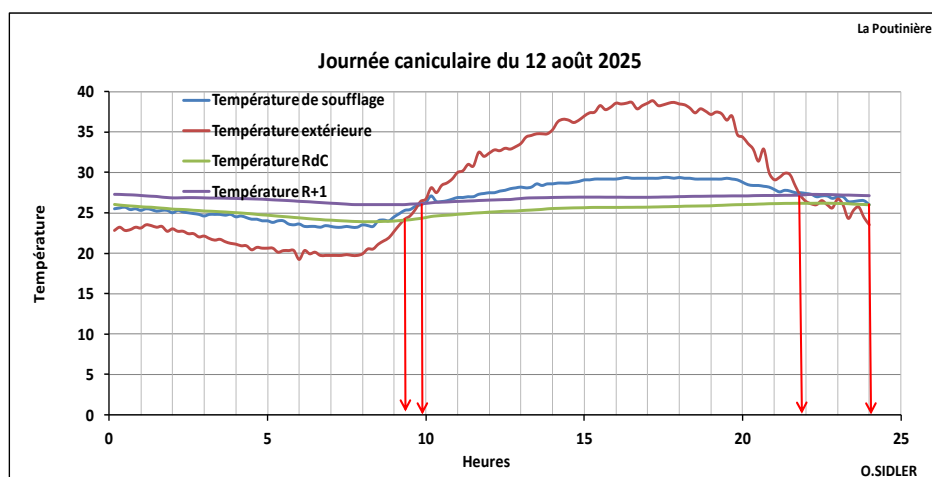


Figure 27 : Evolution des températures durant la journée du 12 août 2025

La journée du 12 août est la plus chaude de l'été : la température extérieure a atteint 38,9°C le jour et est descendue à 19,2°C la nuit, soit une variation de 19,7°C. Dans le même temps la température de soufflage a évolué entre 29,4 et 30,9°C (variation de 1,5°C). Mais le plus intéressant est la stabilité étonnante des températures intérieures : de 23,9 à 26,2°C au RdC, soit 2,3°C d'amplitude, et de 26,0 à 27,3°C à l'étage soit 1,3°C d'amplitude. Le rapprochement des variations de températures intérieures et extérieure atteste d'une bonne protection de la maison aux apports solaires, mais surtout d'une excellente inertie thermique dont le rôle principal est, rappelons-le, de limiter justement l'amplitude des variations de température afin d'améliorer le confort.

On relève également que le rafraîchissement nocturne par ouverture des fenêtres (très efficace dans la Drôme où les températures nocturnes peuvent être assez fraîches) ne peut commencer que vers 21h30 à l'étage et vers 22h au rez-de chaussée et il doit prendre fin vers 9h au

RdC et vers 10h à l'étage. En dehors de ces intervalles la température extérieure est plus élevée que la température intérieure.

Enfin, **cette journée met clairement en évidence le rôle très intéressant de la VMC double flux en période caniculaire** : durant la nuit l'échangeur préchauffe l'air extérieur et envoie dans la maison un air un peu plus chaud (entre 2 et 3°C) que si on avait eu une ventilation simple flux. Ce qui n'est pas très bon ! A vrai dire ceci n'est en réalité pas un réel problème puisqu'on peut y palier partiellement en ouvrant les fenêtres durant la nuit.

Plus intéressant est le rôle de la VMC en journée. On voit que **dès 10h, et jusqu'à 21h30, la température de l'air soufflé est très inférieure à la température extérieure**, cet écart atteignant même 9,6°C en fin d'après midi (valeur la plus élevée de l'année), alors qu'une VMC simple flux aurait insufflé de l'air à la température extérieure. **La VMC double flux apparaît donc comme une source très importante de confort en été, surtout en période caniculaire.** Il faut avoir à l'esprit que dans les 12h de cette journée où la température de soufflage a été inférieure à la température extérieure, c'est 4,7 kWh de chaleur qu'aurait injecté durant ce temps là une ventilation simple flux fonctionnant au même débit (190 m³/h). Soit l'équivalent pendant 12 h de la présence de 6 personnes adultes, ou du fonctionnement pendant 2,5 h, porte ouverte, du four à pleine puissance !

Le paradoxe, mais il est inévitable, c'est que dans la même période de 12h, la température de soufflage est supérieure à la température ambiante, quel que soit l'étage, donc qu'on réchauffe le logement ! Mais c'est effectivement inévitable dès lors qu'on fait le choix de ventiler le logement en permanence, ce qui reste un gage évident de qualité sanitaire.

4 – Consommations d'électricité

4 - 1 Consommation globale annuelle et par usage

Toutes les consommations d'électricité ont été suivies, même si celles qui concernent des appareils portatifs ou de l'éclairage non plafonnier ne figurent pas explicitement puisqu'elles sont comptabilisées au titre de la consommation des prises de courant.

La consommation annuelle d'électricité, tous usages confondus, est de 1 863 kWh. Soit 17,5 kWh/m²shab/an, ou encore 466 kWh/pers/an en supposant qu'il y a eu en moyenne 4 personnes dans le logement. La structure de cette consommation est la suivante :

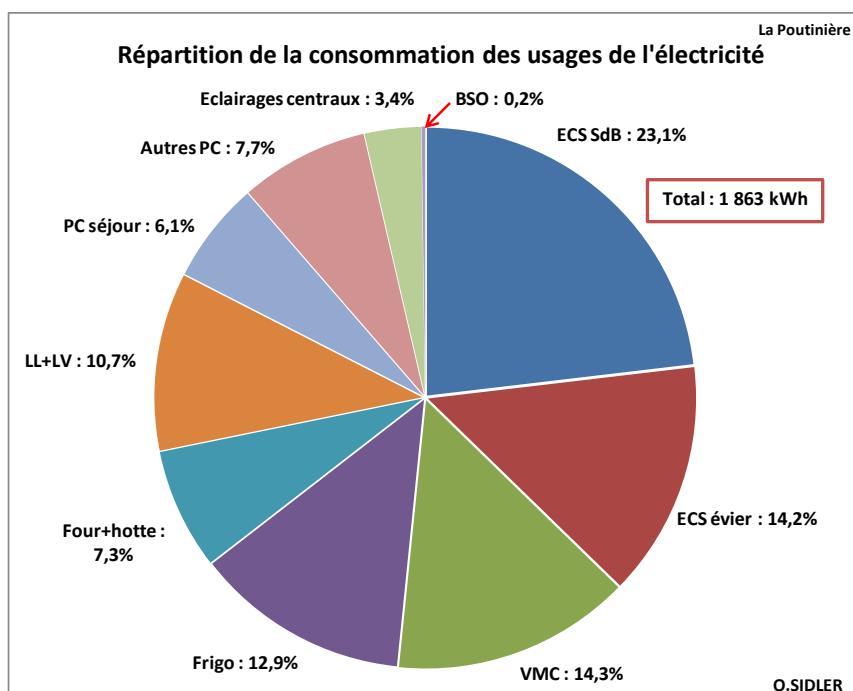


Figure 28 : Répartition de consommation d'électricité par usage

Le principal poste de consommation (23,1%) est la production d'ECS pour la salle de bains, suivi par 2 usages identiques : la production d'ECS de l'évier (14,2%) et la VMC (14,3%). Le froid (un réfrigérateur de 220 litres) représente 12,9%, suivi des machines à laver (10,7%), du four (7,3%), de l'éclairage des foyers plafonniers (3,4%) et enfin des BSO (0,2%). Les usages (non identifiés) sur prises de courant représentent 13,8%. La consommation annuelle de chaque usage est la suivante :

Usages	Consommation
Ch-eau sdb	430,8
Ch-évier	263,6
VMC DF	266,9
Froid	240,4
Cuisson	135,7
Lavage	199,8
PC ouest	113,8
PC diverses	144,3
Eclairage	63,4
BSO	4,0
Total	1 862,6
En kWh	

Figure 29 : Consommation d'électricité par usage

Cette consommation globale est assez faible. Si on retire la consommation pour la production ECS, la consommation d'électricité à usages spécifiques (électroménager) n'est que de 1 168 kWh/an, ou encore de 292 kWh/pers/an.

Le très faible niveau de consommation de la production d'eau chaude sanitaire fera l'objet d'une analyse spécifique au § 4-4.

4 - 2 Saisonnalité des usages

L'étude de la saisonnalité des usages permet de mieux les comprendre pour mieux les adapter aux caractéristiques de la production d'énergie renouvelable, ou dans le cas d'une recherche d'autonomie, de mieux appréhender les choix techniques à faire (production/stockage, etc). Mais il est certain que la dimension à « géométrie variable » de la famille au fil des semaines risque de compliquer l'interprétation. Tentons néanmoins l'exercice....

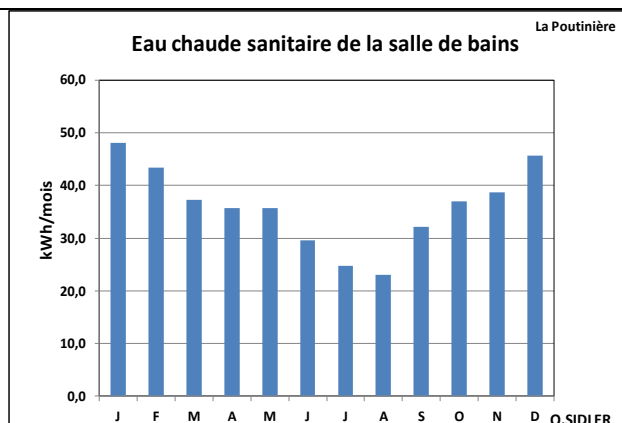


Figure 30 : Saisonnalité de la production ECS SdB

Ce profil est typique de l'usage : les consommations d'ECS pour la toilette sont maximales en hiver et minimales en été.

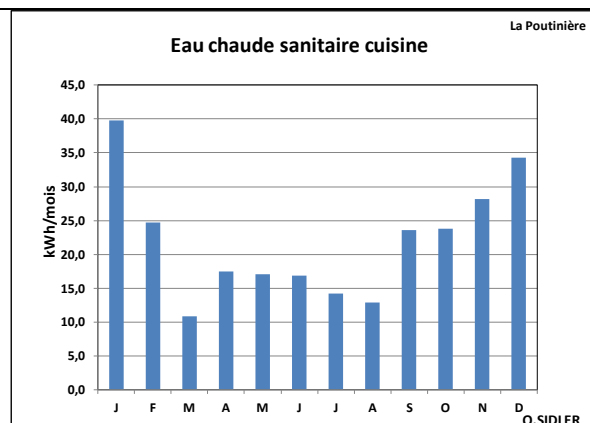


Figure 31 : Saisonnalité de la production ECS cuisine

Ce profil est atypique, notamment à cause des mois d'équinoxe mars et septembre. Sinon il présente la même allure générale que pour la toilette.

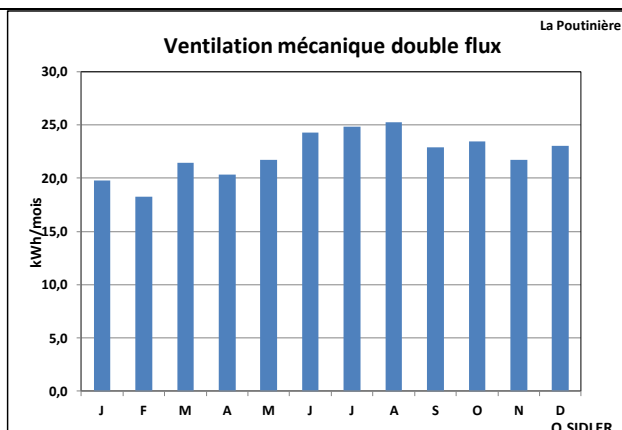


Figure 32 : Saisonnalité de la VMC double flux

Plusieurs phénomènes intéressants se cachent sous ce profil un peu surprenant pour un usage permanent. Voir le §5-4. La tendance à la hausse entre janvier et décembre s'explique par un lent encrassement des filtres et surtout des aubages des ventilateurs.

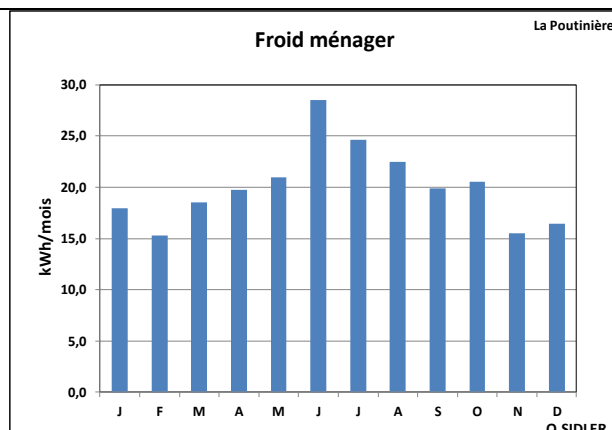
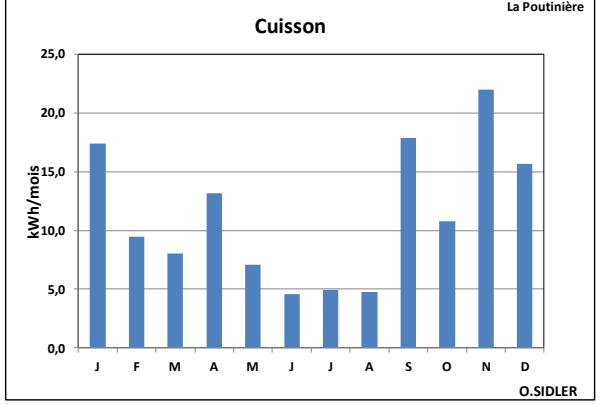
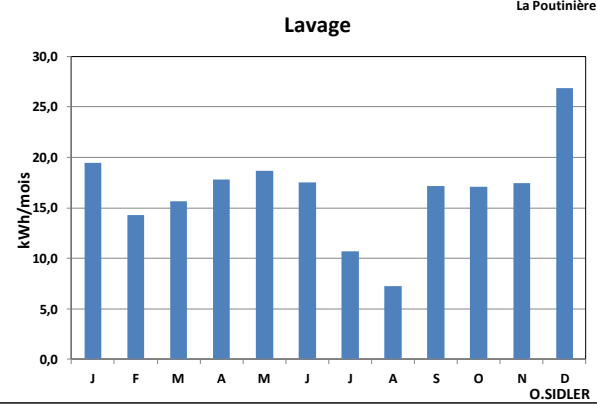
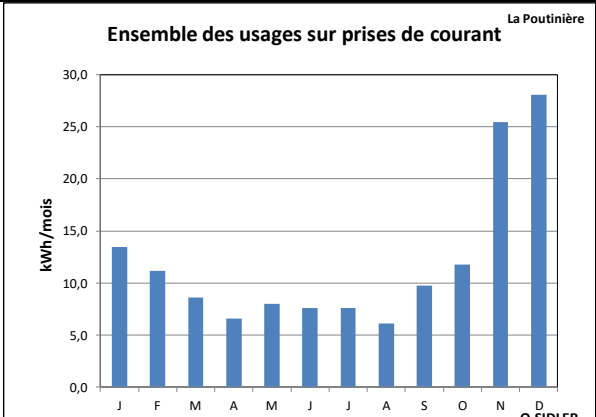
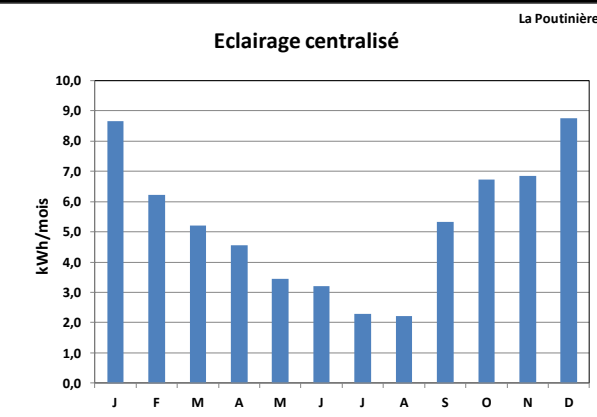


Figure 33 : Saisonnalité de la production de froid ménager

Ce profil est très typique, avec un pic l'été et des périodes beaucoup moins consommatrices l'hiver dues à la fois à un besoin estival plus important et à des températures dans le logement plus élevées l'été.

 Figure 34 : Saisonnalité du four de cuisson	 Figure 35 : Saisonnalité du lavage (LL + LV)
Profil atypique à cause des mois d'avril, de septembre et de novembre probablement marqués par une présence plus importante des quatre enfants.	Profil très atypique (sauf en été) avec un pic surprenant en décembre.
 Figure 36 : Saisonnalité des usages sur prises de courant	 Figure 37 : Saisonnalité de l'éclairage plafonnier
Ce profil très contrasté entre hiver et été s'explique essentiellement par l'utilisation fréquente à partir de début novembre d'un nouvel appareil : un vidéo projecteur de 280 W.	Profil plutôt très typique, avec la différence logique entre été et hiver et avec la « bosse » de l'autonome systématiquement observée.

4 - 3 Consommation de chauffage

Comme il a été indiqué, un convecteur électrique a été mis à disposition des locataires en cas de besoin. Un mesureur était attaché à ce convecteur. Très vite les locataires ont remis l'appareil dans un placard car ils n'en ont quasiment jamais eu besoin.

Au début du mois de janvier, sans pour autant qu'il fasse très froid, les occupants ont ponctuellement mis en route l'appareil avant de le ranger définitivement. **En tout et pour tout la consommation de chauffage a été de 4,7 kWh....**

Calcul des degrés.heures et des degrés.jours en 2025 pour le site avec différentes bases :

Base [°C]	14	15	16	17	18	19	20	21	22
DH	24 974	29 383	34 068	38 954	44 009	49 195	54 479	59 831	65 222
DJU	1 041	1 224	1 420	1 623	1 834	2 050	2 270	2 493	2 718

4 - 4 Production d'eau chaude sanitaire

Rappelons que la production d'eau chaude sanitaire est assurée par deux ballons électriques, l'un de 80 litres placé au RdC juste sous la douche, et l'autre de 15 litres placé sous l'évier. Les deux ballons ont reçu une couche d'isolant supplémentaire. Un récupérateur de chaleur tubulaire récupère la chaleur des eaux grises de la douche afin de préchauffer l'eau froide pénétrant dans le ballon et de participer au mitigeage de l'eau de la douche. Les deux ballons sont équipés d'une résistance de 1 200 W (les plus faibles trouvées sur le marché). Enfin, à compter du 25 mars, le ballon principal a été piloté par une horloge autorisant sa charge entre 12 et 16 h, période de plein ensoleillement.

La température des ballons a été abaissée le plus possible (pour réduire les pertes) tout en respectant les besoins journaliers. A cette fin un dispositif conçu par Enertech permet au locataire de régler facilement et au degré près la température dans le ballon principal dont la température de stockage est donc de 56°C. Pour le ballon sous évier elle est de 48°C.

4-4-1 Consommation annuelle

Comme on l'a vu précédemment la consommation du ballon salle de bain est de **431 kWh/an**, et celui du ballon évier de 264, et **la consommation globale de 695 kWh/an**. C'est un peu moins que la consommation moyenne d'un chauffe-eau thermodynamique....

Cela représente **6,5 kWh/m²/an**, ou encore 174 kWh/pers/an. C'est extrêmement faible au regard de tout ce que nous avons déjà observé....

4-4-2 Pertes de chaleur des ballons

Cette estimation a été faite pendant la période de vacances des locataires, du 20/8 au 30/8.

Les pertes des chauffe-eau ont pu être déterminées avec précision pendant la période de vacances des locataires. La température moyenne dans la cuisine était alors de 23,6°C (peut-être un peu plus (à cause de l'onduleur) dans le local où se trouve le ballon salle de bain). Voici le résultat :

	Ballon évier 15 litres	Ballon salle de bains 80 litres	Ensemble
Période d'observation	du 20/8 à 5h45 au 29/8 à 17h30	du 20/8 à 13h45 au 30/8 à 13h45	
Durée de l'observation [h]	227,75	240	
Consommation [Wh]	2740	6 120	
Conso après correction de température	2740	5 703	
Puissance des déperditions [W]	12,0	23,8	36
Pertes journalières [Wh/j]	289	570	859
Pertes annuelles (kWh/an)	105	208	314
Cr [Wh/j/°C/l]	0,789	0,251	
Part des pertes dans la conso [%]	40,0%	48,3%	45,2%
Besoins annuels hors pertes [kWh]	158	223	381

Figure 38 : Détermination des pertes de chaleur des ballons ECS

La température dans le ballon évier est quasi constante au cours de l'année puisque sa charge se fait en continue. Il n'en est pas de même pour le ballon de la salle de bain dont la charge n'est autorisée qu'une fois par jour. La température moyenne dans ce dernier est donc beaucoup plus basse que 56°C. Le calcul de la baisse de sa température s'effectue à partir des pertes de chaleur statiques et des besoins de production d'eau déterminés avec précision au moyen des volumes d'eau chaude sur les lavabos et ceux sur la douche (qui bénéficient de la récupération de chaleur). Il faut ensuite corriger les pertes en fonction de la température ambiante moyenne à l'année (différente de

celle observée le jour de la mesure). Cela conduit à une température moyenne de ce ballon de 49°C. C'est sur ces bases que sont effectuées les corrections en ligne 4 du tableau précédent.

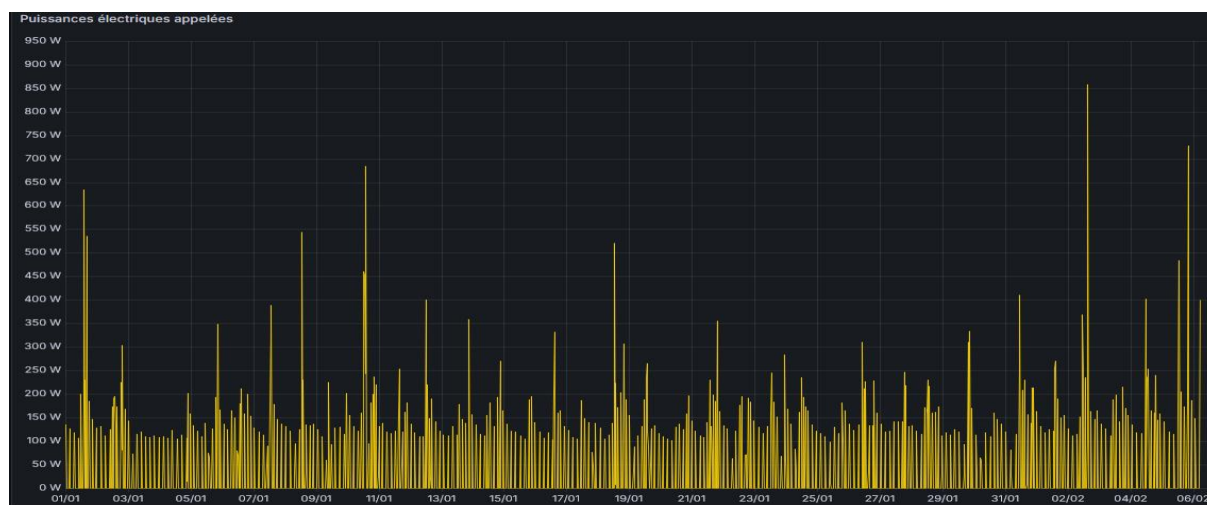


Figure 39 : Profil de charge sur un mois du ballon ECS sous l'évier (sur 5 semaines)

Le profil de charge du ballon évier montre le poids considérable du maintien en température (compensation des pertes) qui constitue un « talon » permanent de consommation.

Le résultat du tableau de la figure 38 met à nouveau en évidence l'importance des pertes des ballons ECS dont les fabricants, inféodés à leurs modèles types de puisage, continuent pourtant à affirmer qu'ils sont suffisamment calorifugés et qu'il est inutile de faire mieux. Il faut avoir à l'esprit que ce qui est proposé ici n'est probablement qu'une préfiguration de ce qui se fera de façon courante demain : une surisolation (bien imparfaite) des cuves, une localisation sur les points de puisage évitant des consommations inutiles d'eau chaude (5 litres d'eau soutirés pour avoir enfin un verre à dent d'eau tiède !), des usagers évitant les usages au fil de l'eau et contrôlant mieux les soutirages qu'ils effectuent. Cette réduction des « besoins au robinet » conduira mathématiquement à ce que les pertes des ballons, si elles ne sont pas améliorées, représentent beaucoup plus de la moitié des consommations du poste eau chaude sanitaire. Ici, **les pertes pour l'ensemble des deux ballons dépassent 45%**. C'est considérable. On en déduit que les « besoins annuels au robinet » ne sont que de 158 kWh sur l'évier et de 223 kWh pour la toilette, soit **un total de 381 kWh/an pour le logement, ou encore 3,6 kWh/m²shab/an**.

Gardons aussi à l'esprit que, contrairement à la plupart des installations d'eau chaude sanitaire, le rendement de distribution de celle-ci est proche de 100% grâce à la proximité de la production et de l'usage. Mais ce rendement est habituellement assez mauvais, ce qui explique pourquoi le rendement global des installations d'eau chaude est si dégradé (donc que les consommations sont élevées). Il semble pourtant assez facile d'améliorer très sensiblement cela....

L'expérience tentée dans cette maison s'exposait à un certain nombre de risques au regard des pratiques traditionnelles concernant l'eau chaude sanitaire. Pourtant on retiendra que :

- Un ballon destiné aux usages des seules salles d'eau de seulement 80 litres pour 4 personnes est suffisant pour autant qu'il s'accompagne d'un récupérateur de chaleur des eaux usées sur la douche.
- Le dispositif mis au point par Enertech permettant à l'utilisateur de régler précisément la température d'eau chaude du ballon (sans « se plier en 4 » pour aller tourner une molette introuvable et imprécise sous le ballon) a conduit le locataire à adopter une

température de 56°C limitant ainsi les pertes de chaleur qui restent le fléau de tous les ballons de stockage.

- Le couplage d'un ballon électrique avec des panneaux photovoltaïques sera d'autant plus efficace que la puissance électrique des ballons sera faible. On a choisi ici les plus faibles puissances trouvées sur le marché (1 200 W pour les deux ballons) mais des puissances moitiées auraient été encore meilleures.
- Compte tenu à la fois du niveau de pertes thermiques des ballons (malgré leur surisolation) d'autant plus significatif en valeur relative que la consommation des usagers est réduite, et de l'impossibilité d'asservir à un fonctionnement journalier unique un petit ballon (cuisine), il semble qu'un seul ballon de 100 l au lieu de 80 aurait été une option plus intéressante à la fois pour réduire la consommation globale d'électricité (réduction des pertes) et pour optimiser le taux de couverture des apports solaires.

4-5 Efficacité de l'échangeur de la ventilation double flux

La mesure de l'efficacité de l'échangeur de la ventilation double flux est relativement complexe si on cherche à qualifier les qualités de l'échangeur sans tenir compte des perturbations thermiques qu'il peut subir. On se référera à la note de synthèse disponible sur le site d'Enertech (<https://www.enertech.fr/wp-content/uploads/modules/catalogue/pdf/46/methodes-determination-efficacite-echangeur-double-flux.pdf>).

Nous avons donc d'abord déterminé une efficacité en température conforme à la première définition présentée dans le document d'Enertech :

$$\eta_1 = (T_{as} - T_{ext}) / (T_{ae} - T_{ext})$$

T_{ext} : Température extérieure

T_{as} : Température de l'air soufflé

T_{ae} : Température de l'air extrait (air vicié) (égal ou proche de la température ambiante)

Cette évaluation a le mérite d'être simple, mais si le caisson est dans un volume chauffé (ce qui est le cas puisqu'il est dans le cellier adjacent à la cuisine), elle n'est pas absolument exacte puisque des flux de chaleur « perturbateurs » sont pris en compte et biaisent le calcul du rapport des températures. En effet, des transferts de chaleur peuvent avoir lieu entre la pièce chauffée et le caisson, à savoir :

- Réchauffement de l'air extérieur, ce qui implique une température plus élevée en entrée de l'échangeur, une température plus élevée de l'air rejeté (pertes thermiques) et surtout une température plus élevée de l'air soufflé et donc une efficacité « observée » plus élevée.

- Réchauffement de l'air rejeté à travers le caisson : Pertes thermiques directement vers l'extérieur.

Il s'ensuit qu'à certains moments de l'année les résultats de ce calcul peuvent être aberrants avec des valeurs de l'efficacité pouvant dépasser 100 %. On a donc éliminé les valeurs incohérentes pour faire le traitement des données.

Pour tenter d'avoir une vision un peu meilleure de la qualité du service rendu par l'échangeur, le Passivhaus Institut a proposé le concept de « taux effectif de mise à disposition de chaleur » qu'il considère comme la méthode d'évaluation la plus juste :

$$\eta_2 = (T_{ae} - T_{ar} + P_{el} / (m \cdot c_p)) / (T_{ae} - T_{ext})$$

avec :

P_{el} : la puissance électrique des ventilateurs W (connue pour nous toutes les 10')

m : débit massique d'air en kg/s

c_p : capacité calorifique de l'air en J/(kg.K)

T_{ext} : Température extérieure

T_{ar} : Température de l'air rejeté

T_{ae} : Température de l'air extrait (air vicié) (égal ou proche de la température ambiante)

C'est au sens du Passivhaus Institut la « vraie » définition, car elle ne prend pas en compte la chaleur prélevée dans l'ambiance par l'air soufflé (ce qui affecterait (en l'augmentant) la valeur de l'efficacité) et elle prend en compte la chaleur transmise à travers le boîtier qui réchauffe l'air frais rejeté, et qui dégrade donc l'efficacité. Enfin, elle évite de faire un calcul avec une valeur théorique non réelle d'enthalpie définie par un taux d'humidité extérieure très sec.

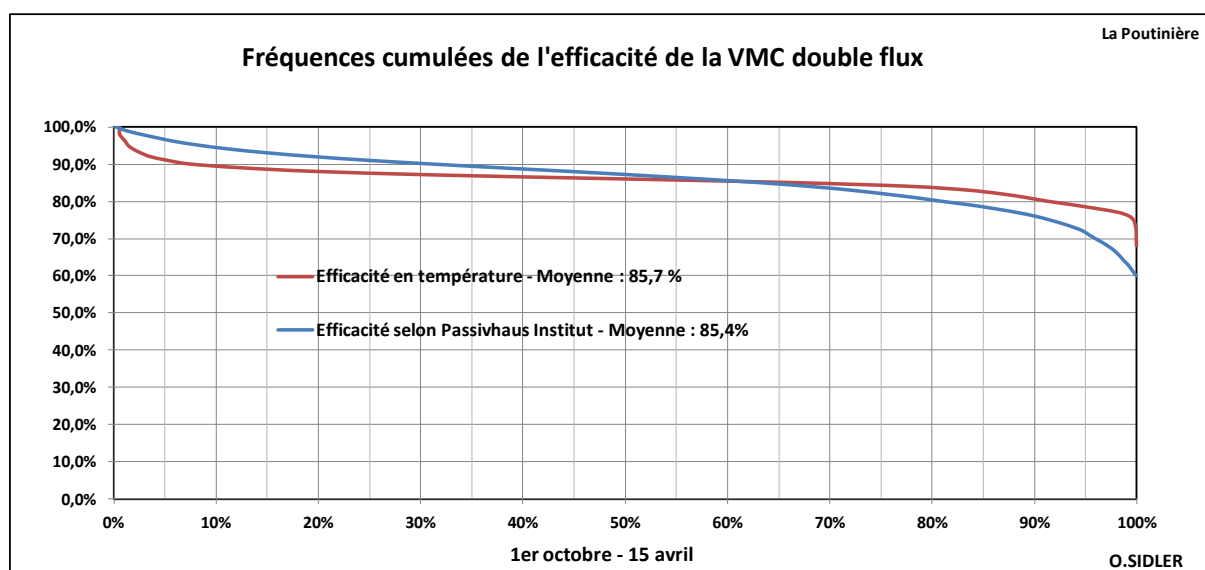


Figure 40 : Comparaison de l'efficacité en température et de l'efficacité selon le Passivhaus – Caisson VMC double flux

Il apparaît que, quelle que soit la méthode de calcul, la valeur moyenne de l'efficacité sur la saison de chauffage se situe entre 85 et 86% ce qui est remarquable. On notera que les deux méthodes ne conduisent toutefois pas à la même plage de variation annuelle de l'efficacité.

5 – Puissances appelées

L'un des objectifs poursuivis dans ce projet était de minimiser les puissances électriques appelées. C'est à ce titre que les plaques à induction ont été bannies. C'est aussi à ce titre que les puissances électriques choisies pour les deux ballons ECS sont les plus faibles trouvées sur le marché. Mais bien sûr il existe des usages dont la puissance appelée est incompressible.

Aucune consigne d'utilisation visant à gérer les appels de puissance n'a été donnée aux locataires. Il est donc probable qu'on pourra faire un peu mieux que ce qui suit....

5 - 1 Fréquences cumulées

Pour des raisons de lisibilité, les fréquences cumulées des puissances appelées au compteur général sont présentées sous forme de deux graphiques :

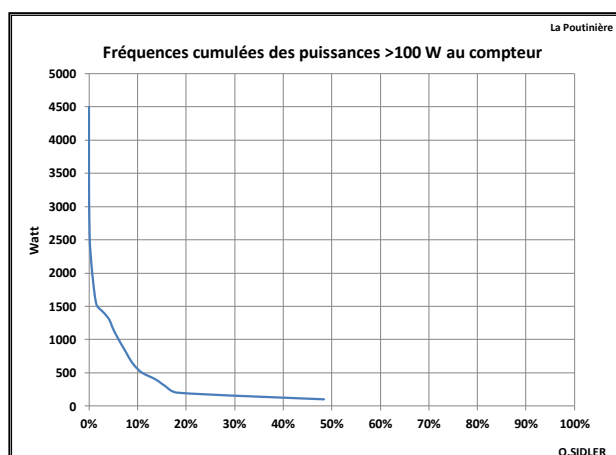


Figure 41 : Fréquences cumulées des puissances > 100 W

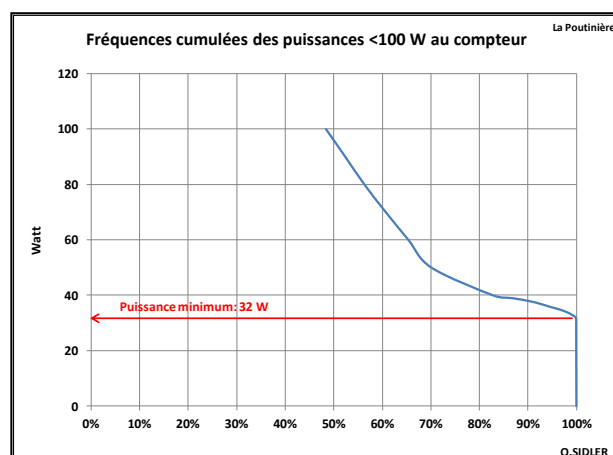


Figure 42 : Fréquences cumulées des puissances < 100 W

La puissance appelée varie de 32 W....à 4 500 W (il est vrai pendant seulement 10'). La valeur de 3 000 W est dépassée pendant 3,3h, celle de 2 500 W pendant 15,5 h (0,2%) et celle de 2 000 W pendant 48h (0,6%). Ces durées sont très courtes et sont dues à la mise en marche d'appareils dont on aurait pu la plupart du temps éviter le fonctionnement simultané.

A l'autre extrémité du spectre on observe une puissance minimale de 32 W qu'on pourrait assimiler à une puissance de veille. Méfiance.

5 - 2 Puissance et consommation de veille

Ce bâtiment comporte une VMC double flux fonctionnant en permanence. Il est donc nécessaire de la neutraliser pour y voir plus clair :

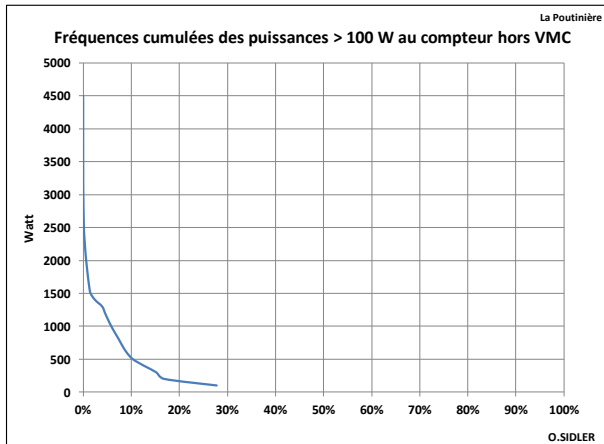


Figure 43 : Fréquences cumulées des puissances hors VMC
>100 W

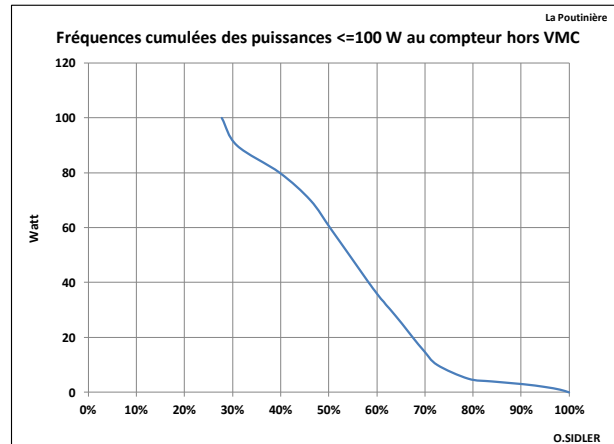


Figure 44 : Fréquences cumulées des puissances hors VMC
<100 W

Il n'y a évidemment aucun changement visible sur les puissances supérieures à 100 W, mais on observe, pour les puissances plus faibles, que le minimum est 0 W. **Ce logement ne comporte donc aucune veille permanente (ce qui est très rare).** Dans l'intervalle 79 à 100 % de l'année (plus de 1 800 h/an) on constate toutefois la présence de puissances inférieures ou égale à 5 W. Ce peut bien sûr être la présence de chargeur pendant quelques heures chaque jour, mais il est probable qu'il s'agisse aussi de petits appareils laissés sous tension (par oubli) la nuit. Quoiqu'il en soit ce logement est remarquable par l'absence massive des veilles qui ont envahi à peu près tous les logements aujourd'hui....

5 - 3 Eclairage centralisé

Le logement n'était équipé lors de sa livraison que d'ampoules et de spot (éclairage extérieur) led. On peut donc s'attendre à des puissances appelées raisonnables :

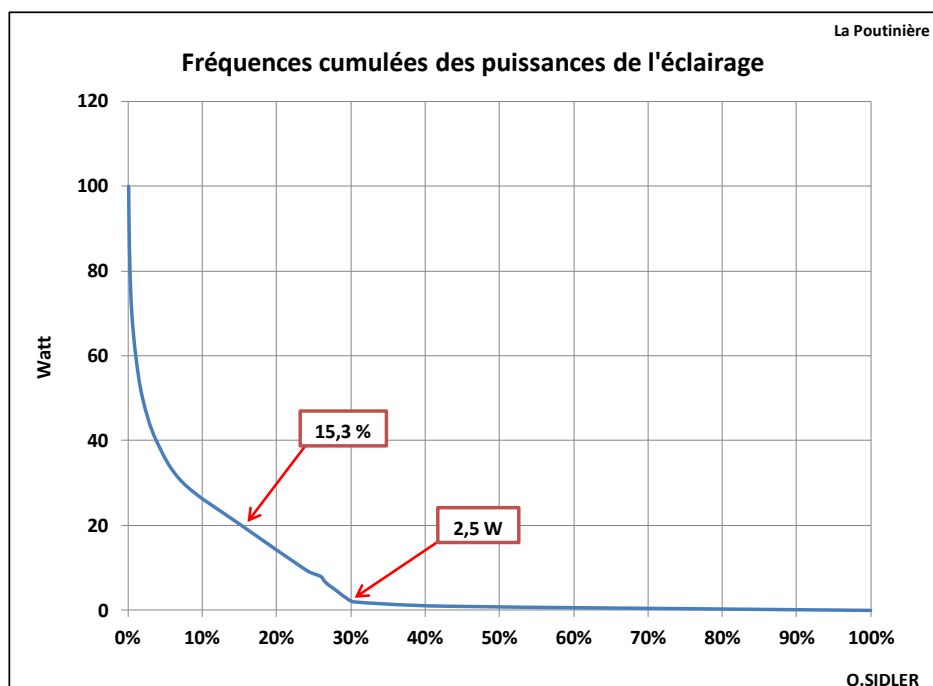


Figure 45 : Fréquences cumulées des puissances d'éclairage centralisé

Précisons que seuls ont été pris en compte sur ce graphique les foyers lumineux commandés par des inter muraux à l'exception de ceux qui sont alimentés par prises de courant (limités à 2 lampes dans le séjour).

On constate que l'éclairage n'est utile que 30% du temps, que 84,5 % du temps les puissances appelées sont inférieures à 20 W et que pendant 98,1 % elles sont inférieures à 50 W.

5 - 4 Ventilation mécanique double flux

Pourquoi s'intéresser aux fréquences cumulées d'un usage fonctionnant toute l'année de la même manière et donc à puissance constante ? Et bien parce que, comme l'illustre le graphique ci-dessous, la puissance varie de façon non négligeable malgré tout.

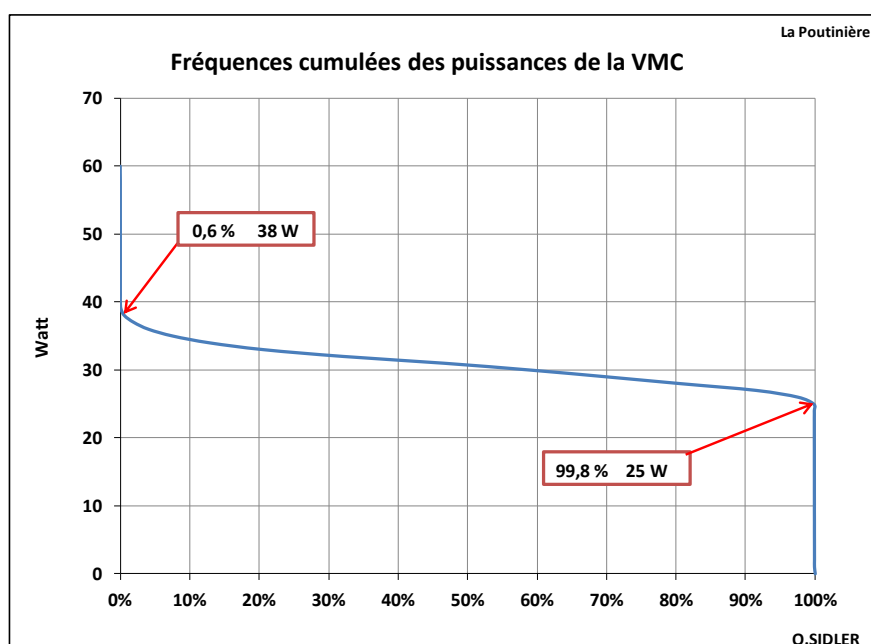


Figure 46 : Fréquences cumulées des puissances de la VMC

La première surprise a lieu le 25/4 à 14h00 lorsque, sans que l'on sache pourquoi, la puissance des ventilateurs est passée de 29 W à 13h50 à 59 W à 14h et ce jusqu'à 15h40 où la puissance est revenue à 29 W comme s'il ne s'était rien passé, et sans l'intervention de qui que ce soit)....

La seconde surprise est de constater que la puissance au cours de l'année varie de 25 à 38 W. Il y a deux explications à ce phénomène :

- La première est évidente : l'encrassement des filtres. Consigne, pas toujours suivie, a été donnée aux locataires de nettoyer les filtres tous les deux mois. Le premier nettoyage après les trois premiers mois de fonctionnement a immédiatement réduit la puissance appelée de 10%. **Il faut réaffirmer le rôle essentiel du nettoyage des filtres qui doit être assez fréquent pour garantir un débit de renouvellement d'air constant et maintenir une puissance électrique de fonctionnement raisonnable. Même à la campagne une périodicité de deux mois semble nécessaire.** Cela reste une opération très simple qui peut se faire avec un aspirateur et qui ne prend que 5 minutes....



Figure 47 : Passage immédiat de la puissance appelée de 32 à 28,5 W après nettoyage des filtres

- La seconde explication est un constat plus qu'une explication. On a en effet observé que plus la température de l'air extérieur était élevée plus la puissance des ventilateurs augmentait. La figure 32 (saisonnalité de la consommation de la VMC) montre clairement l'augmentation estivale de cette consommation. Mais le phénomène a aussi lieu tous les jours de l'année comme l'illustre cette séquence de 48 h pendant laquelle la puissance évolue de 33 W à 36 W :

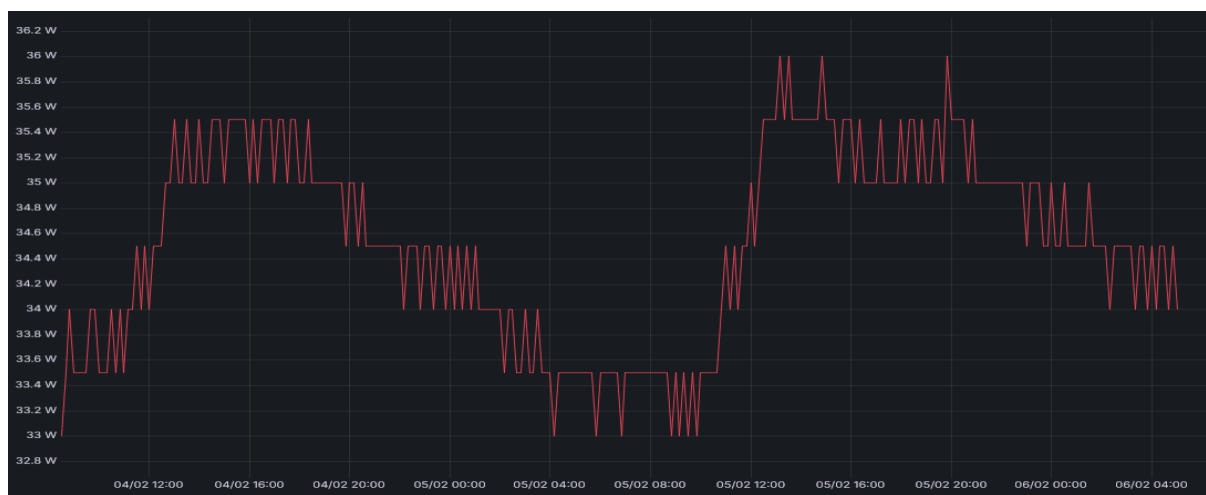


Figure 48 : Evolution de la puissance des ventilateurs

On observe que la puissance évolue de 33 W à 4h à 36 W dans l'après midi (à noter que le niveau de puissance appelée indique que les filtres sont très encrassés).

L'explication de ce phénomène n'est pas évidente. On sait que le débit volumique des ventilateurs du type de ceux en place est constant (quelle que soit la température : c'est le débit massique qui varie). Or la puissance absorbée par les moto-ventilateurs vaut :

$$P = D * \Delta P / \eta \quad [W]$$

Où :

D : débit volumique [m^3/s]

ΔP : Pertes de charge [Pa]

η : rendement du moto ventilateur [-]

Le débit volumique est constant. Si la température augmente, la viscosité de l'air diminue et donc les pertes de charge devraient diminuer. Reste le rendement du moto-ventilateur : pour expliquer l'augmentation de puissance, il faudrait que le rendement du moto-ventilateur diminue de façon sensible lorsque la température augmente. Si un lecteur peut nous donner une explication, nous le remercions par avance !

5 - 5 Puissance maximum de chaque usage

La puissance absorbée par un appareil n'est pas en permanence celle indiquée sur sa fiche technique. Si la tension varie la puissance des éléments résistifs augmentera avec le carré de la tension (vrai pour des chauffe-eau, ainsi qu'en bonne partie les lave-vaisselle et lave-linge ou encore les fours). Il était donc intéressant de déterminer quelle était la puissance maximum atteinte par chaque appareil important, sachant qu'une augmentation de la puissance appelée c'est aussi, dans certains cas, une augmentation de la consommation, pas dans le cas d'un chauffe-eau ou d'un grille pain qui atteignent seulement plus vite l'objectif qui leur est assigné, mais par exemple dans celui des appareils à régulation « chronométrique » (ils fonctionnent pendant une durée déterminée) comme certains lave-vaisselles.

	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Usage	LL	Four	LV	ECS Sdb	ECS évier	Aspirateur	Eclair ext	Frigo	BSO rdc	Eclair R+1
Puiss max (W)	2 396	2 292	1 858	1 431	1 329	1 074	318	108	42	36
Jour-heure	9/7 13:10	1/4 7:30	13/2 13:10	1/5 13:50	8/5 13:10	22/3 15:10	1/11 19:40	30/10 12:40	25/11 17:50	18/12 20:30

Figure 49: Puissance maximum atteinte par les principaux appareils au cours de l'année

Bien que vendue pour 1 200 W on voit que la puissance atteinte par la résistance du chauffe-eau de la salle de bains atteint 1 431 W, ce qui suppose une tension de 251 V (rien d'étonnant le 1^{er} mai (férié) à l'heure du repas !). On observe d'ailleurs que presque tous les appareils susceptibles de fonctionner entre 12 et 15h (donc ni les BSO ni les éclairages *a priori* !) ont atteint leur puissance maximum dans cette fourchette horaire où la toiture photovoltaïque de la maison et celle des bureaux d'Enertech à quelques mètres (au total 33 kWc) produisent beaucoup de courant ce qui augmente inévitablement la tension du réseau localement.

5 - 6 Structure des 10 appels de puissance les plus élevés

L'exercice poursuivi maintenant consiste à identifier les dix appels de puissance les plus importants qui ont eu lieu pendant l'année et de voir quels sont les appareils (limités à quatre ici) en fonctionnement à ce moment là. Cette approche, beaucoup utilisée en secteur tertiaire pour mieux piloter les pointes, a évidemment aussi un intérêt dans le cas d'une maison individuelle, même si l'utilisateur n'a pas toujours la possibilité d'agir. Cela permet d'identifier « les coupables » et de voir s'il est possible de les piloter différemment.

Quel est l'intérêt de cette démarche ? Pour le particulier lui-même l'intérêt est un peu limité. Mais cela pourrait lui permettre de réduire de plusieurs kVA la puissance d'abonnement qu'il doit souscrire (puisque aujourd'hui on peut choisir le nombre de kVA). A lui de juger si l'intérêt économique associé à la contrainte que lui impose ce nouveau fonctionnement en vaut la peine...

En revanche pour le réseau et pour RTE, cette approche est très intéressante et permettrait de limiter la construction de centrales électriques en gérant mieux, avec une charge accrue, celles qui

existent déjà. La démarche du particulier serait donc essentiellement altruiste, « civique » et désintéressée, même si elle lui serait *in fine* économiquement bénéfique !

Date	P max	1	2	3	4
14/1 à 12:50		Four	ECS SdB	ECS évier	Frigo
	4 526	1 972	1 263	1 205	42,5
12/1 à 10:30		Four	Conv elec	LV	Frigo
	4 486	2 071	1 381	933	41
14/12 à 12:40		ECS SdB	ECS évier	Four	LL
	4 330	1 279	1 236	1 167	549
15/11 à 12:40		Four	ECS SdB	ECS évier	Frigo
	3 764	1 980	1 288	394	51,5
9/1 à 11:50		LL	ECS SdB	VMC	Eclairage
	3 537	2 136	1 266	28	28
19/2 à 13:00		LL	ECS évier	Hotte	VMC
	3 496	2 181	1 217	29,5	28
26/5 à 12:00		LL	Four	Frigo	VMC
	3 490	2 099	1 267	77	31
17/11 à 12:50		ECS SdB	Four	ECS évier	Frigo
	3 484	1 318	1 141	853	82
2/4 à 14:10		ECS SdB	ECS évier	Aspirateur	Frigo
	3 457	1 295	1 257	785	72
2/11 à 13:00		Four	ECS SdB	VMC	Eclairage
	3 223	1 835	1 264	32	26,5

Figure 50 : Structure des dix appels de puissance les plus importants de l'année

Les appareils dont la puissance dépasse 1 000 W dans ce tableau sont au nombre de 6 : les deux chauffe-eau, le four, le lave-linge, le lave-vaisselle et le convecteur électrique. On se souviendra que la charge du chauffe-eau de la salle de bains n'a été autorisée à fonctionner entre 12 et 16h qu'à partir du 25 mars. Dès lors on peut déduire une stratégie simple d'utilisation des appareils :

- Commencer par décaler vers 13h ou 13h30 le début de l'autorisation de fonctionnement du chauffe-eau de la salle de bains afin de laisser « la place libre » au four de la cuisine auparavant.
- Placer éventuellement une horloge sur le chauffe-eau sous évier (qui fonctionne « au fil du temps ») afin de lui interdire un fonctionnement entre 11 et 13h donnant à nouveau la priorité au four, et autoriser plusieurs créneaux de fonctionnement en période d'insolation et même en dehors compte tenu du faible volume du ballon.
- Suggérer aux locataires de faire fonctionner le LL et le LV séparément et de veiller à ne jamais les mettre en marche entre 11h30 et 15h ou 15h30.
- D'une manière générale on suggérera aux locataires de veiller à ne jamais faire fonctionner deux de ces 6 appareils en même temps.

Il n'est pas certain qu'on arrive à supprimer totalement ces pointes un peu atypiques, mais on en réduira leur fréquence. Il est aussi intéressant d'observer que, d'une manière générale, la plupart des pointes pourraient être évitées par un comportement des usagers. A l'échelle de la France, l'impact pourraient être très important, sur un sujet majeur.

6 – Production photovoltaïque

6 - 1 Production annuelle

Rappelons que l'installation photovoltaïque occupe le pan sud de la toiture en totalité, soit environ 45 m². La puissance est de 8,9 kWc. La production annuelle du 1/1 au 31/12/2025 a été de **12 507 kWh**. Il s'agit d'une production en baisse d'environ 5% sur l'année précédente. Le facteur de charge est le rapport de l'énergie réellement produite à l'énergie maximum qu'auraient produit les 8,91 kWc 24h sur 24 et 365 jours par an. Il vaut **16,0%**.

6 - 2 Saisonnalité de la production

La production photovoltaïque a évolué de manière très régulière sans que l'on connaisse de mois « catastrophique » cette année. Les mois de novembre et de décembre ont connu des jours de neige annulant quasiment toute production. Avec 1 664 kWh le mois de juillet est le plus productif. A l'opposé, le mois de janvier qui n'a pas connu de jour de neige, n'a produit que 495 kWh, soit 3,4 fois moins qu'en juillet. La moyenne mensuelle de production est de 1 041 kWh/mois.

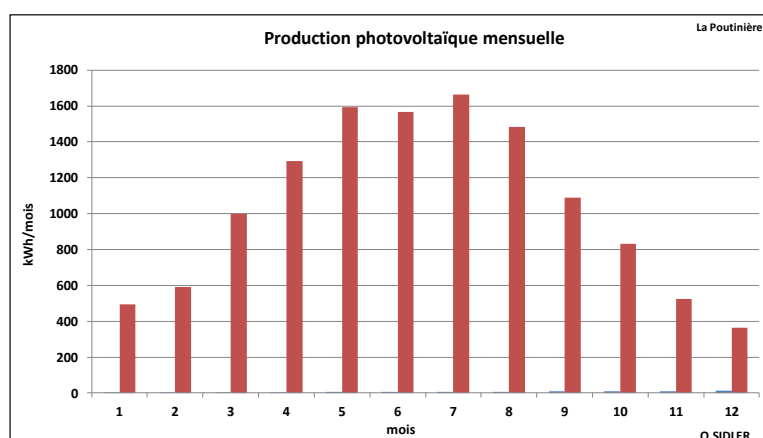


Figure 51 : Saisonnalité de la production photovoltaïque

6 - 3 Fréquences cumulées de la production journalière

La courbe des fréquences cumulées de la production quotidienne est quasiment linéaire, passant d'un minimum pratiquement nul les jours de neige à plus de 65 kWh (le 24 mai). En moyenne sur l'année, la production est de 34,3 kWh/j.

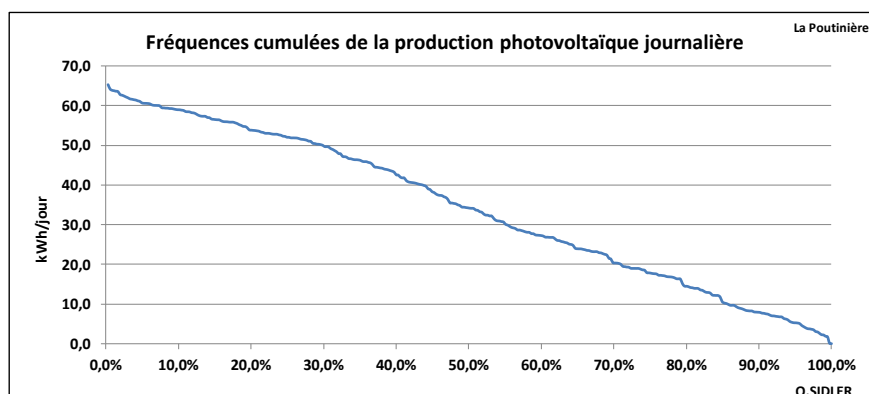


Figure 52 : Fréquences cumulées de la production photovoltaïque journalière

6 - 4 Fréquences cumulées des puissances apparentes maximum journalières

La valeur maximale de la puissance apparente atteinte est de **8 270 VA**. Il apparaît que cette puissance maximale quotidienne (qui est une vraie puissance « ponctuelle » par opposition à la puissance active qui est une moyenne sur 30 minutes) reste très élevée tout au long de l'année puisque pendant 50% des jours elle est supérieure à 7 000 VA et pendant 86,6% elle est encore supérieure à 4 500 VA. Il n'y a guère que 36 jours par an pendant lesquelles elle est inférieure à 3 100 VA. Mais attention, cet indicateur signifie uniquement que cette valeur de pointe est atteinte pendant un instant dans une journée, ce qui n'implique pas que toute la journée bénéficie de ce niveau d'insolation. Dix minutes de plein soleil vers 13 h durant une journée chargée en permanence de nuages donnera une bonne valeur de la puissance apparente de la journée malgré une production quotidienne assez faible ce jour là.

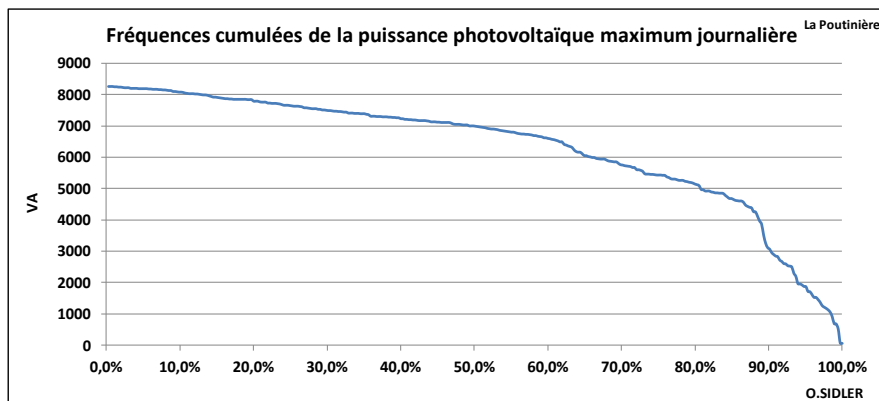


Figure 53 : Fréquences cumulées de la puissance photovoltaïque apparente maximum journalière

6 - 5 Production journalière au cours de l'année

La production quotidienne varie énormément d'un jour à l'autre, fluctuant évidemment en fonction de la météo, mais avec ceci de remarquable qu'hormis les jours de neige, la production n'est jamais nulle, n'étant inférieure à 5 kWh/j que 15 jours/an, et inférieure à 10 kWh/j 52 jours/an (14,5%).

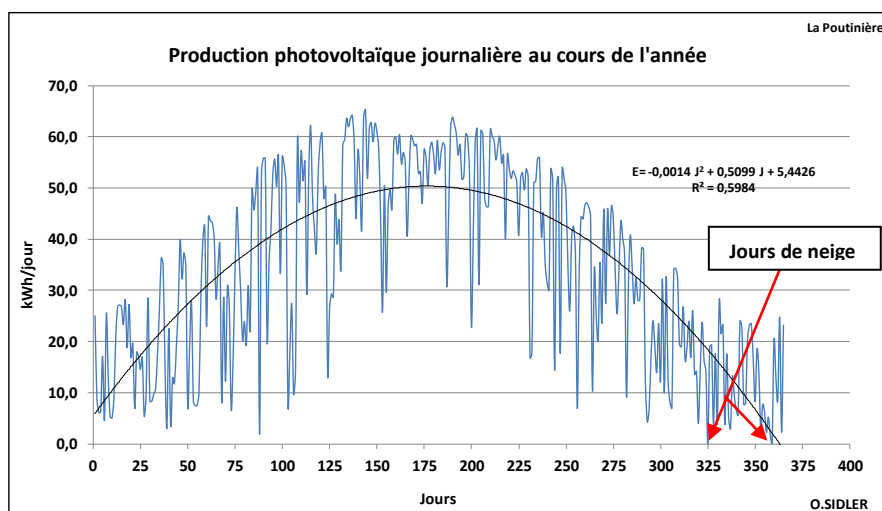


Figure 54 : Production photovoltaïque journalière

Bien que la courbe tendance proposée ne soit évidemment pas très représentative des fluctuations journalières réelles (R^2 très moyen), son équation donne une idée de la production moyenne qu'on peut attendre, pour cette installation en ce site précis, un jour J donné de l'année (J est le numéro du jour dans l'année, de 1 à 365) :

$$E = -0,0014 \cdot J^2 + 0,5099 \cdot J + 5,44 \quad [\text{kWh/j}]$$

En intégrant cette fonction sur l'année elle fournit une valeur de la production annuelle (13 260 kWh) finalement assez proche de la valeur réelle (12 507 kWh) ce qui la crédibilise....

6 - 6 Production hebdomadaire

Autre mode d'évaluation de l'apport photovoltaïque : la production hebdomadaire. Elle culmine à 414 kWh pour une semaine du mois de mai mais n'est pratiquement jamais inférieure à 100 kWh, sauf fin décembre (neige et beaucoup de nuages).

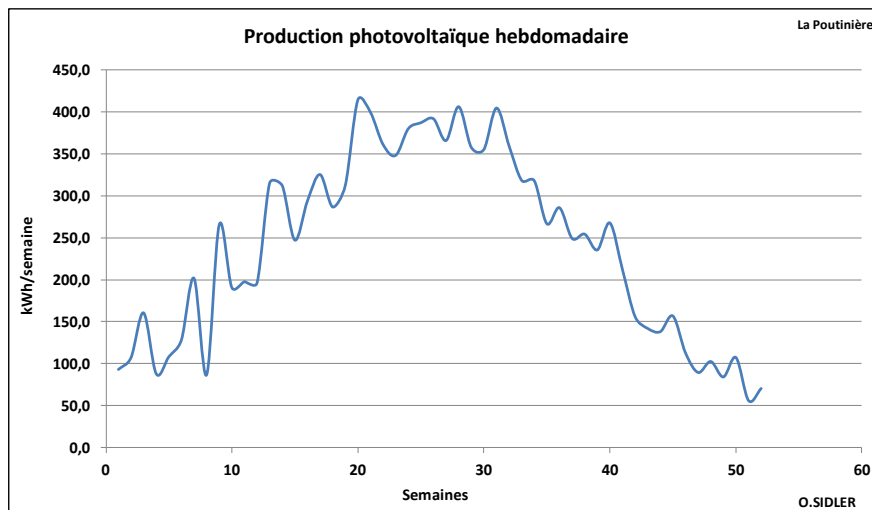


Figure 55 : Production photovoltaïque hebdomadaire

7 – Couverture des besoins par la production photovoltaïque

Bien que l'installation ne soit pas en autoconsommation mais en vente totale (par le propriétaire) et achat par le locataire de l'électricité consommée, il est très intéressant d'analyser la simultanéité des phases de consommation et de production. Cette approche peut se faire sous forme d'énergie (à la journée, la semaine ou l'année) ou sous forme de puissance.

7 - 1 Bilan annuel en énergie

La réalité a été encore meilleure que toutes les prévisions faites. Il avait été envisagé que la production soit 5 fois plus importante que la consommation.

Mais elle a été de 12 507 kWh et la consommation de 1863 kWh, si bien que **la maison a produit 6,7 fois plus d'électricité qu'elle en a consommée !**

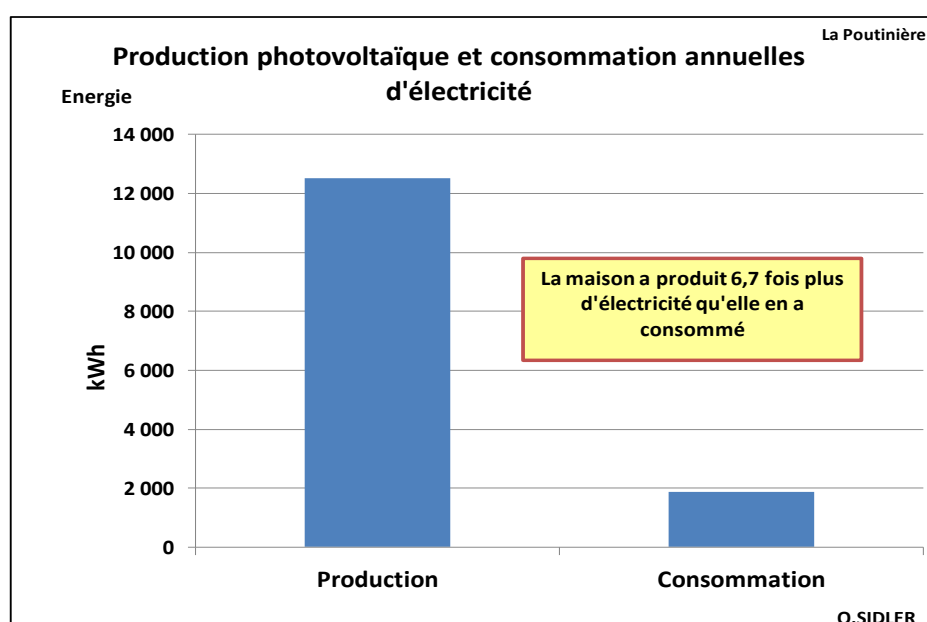


Figure 56 : Production photovoltaïque et consommation d'énergie annuelles

En modifiant la focale on peut établir ce bilan à des échelles de temps plus courtes :

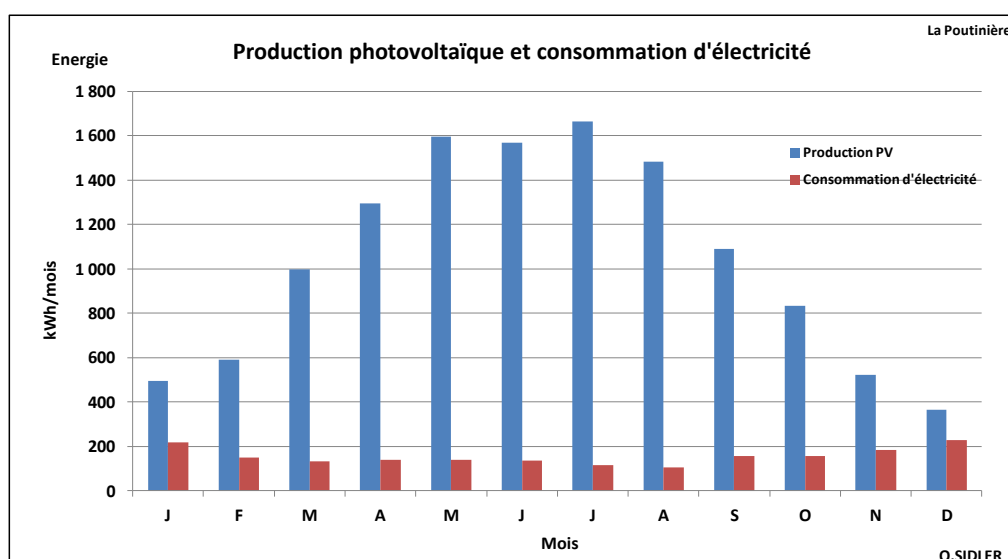


Figure 57 : Production photovoltaïque et consommation d'énergie à l'échelle du mois

La production photovoltaïque est très supérieure à la consommation, quel que soit le mois de l'année. Même en décembre, où la consommation mensuelle est la plus importante de l'année et la production minimum, elle ne représente que 62,7 % de la production. En janvier elle représente 43,8 % de la production, et à l'opposé, en juillet elle ne représente plus que 7,0 % de celle-ci.

On peut encore zoomer et établir des bilans hebdomadaires :

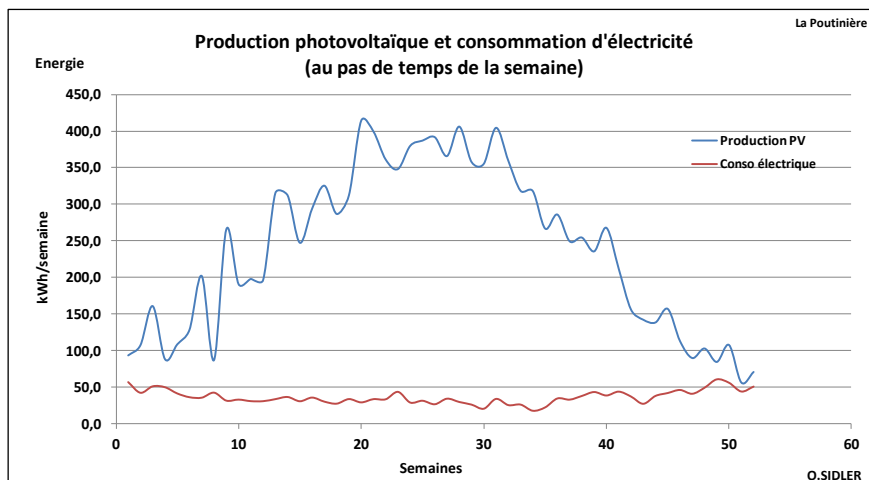


Figure 58 : Production photovoltaïque et consommation d'énergie à l'échelle de la semaine

Mais la conclusion est la même à l'échelle hebdomadaire : la production excède la consommation toutes les semaines de l'année sans exception. La semaine 51 (semaine précédant Noël) a été la plus critique (la consommation a représenté 78,1% de la production), comme la plupart des semaines de décembre, suivie de la première semaine de l'année avec 60,7%. A l'opposé, pendant la dernière semaine de juin la consommation n'a représentée que 5,6 % de la production.

7 - 2 Journées types

L'illustration par journées types introduit l'approche en puissance qui sera vue au § 7-4.

On présente dans ce qui suit les journées types déjà utilisées précédemment (6/1 peu de soleil, 16/1 ensoleillement médian et 29/1 maximum d'ensoleillement pour le mois de janvier) auxquelles on a ajouté les journées du 4 et du 11/6 (la moins et la plus ensoleillée du mois de juin).

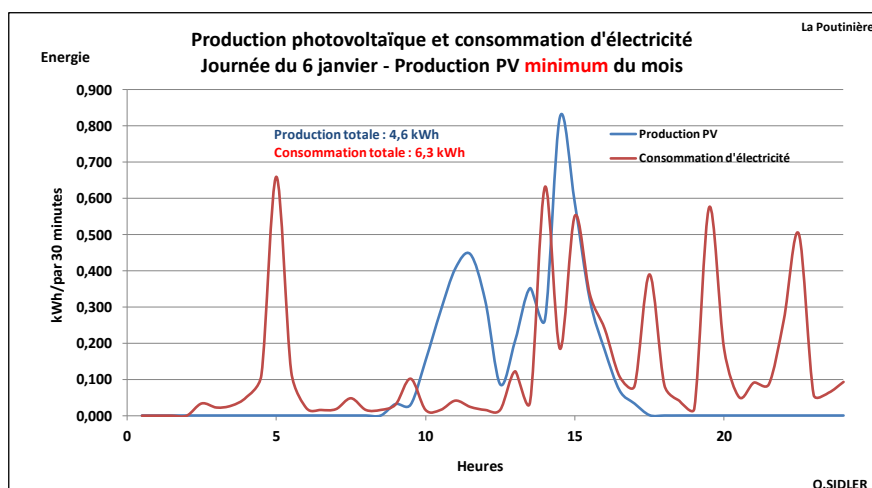


Figure 59 : Production photovoltaïque et consommation d'énergie le 6 janvier (plus faible insolation du mois)

On observe que, malgré le faible ensoleillement, les besoins sont presque intégralement couverts (84,3%) par la production photovoltaïque entre le lever et le coucher du soleil. En revanche, en dehors de cet intervalle évidemment la couverture est nulle et les besoins substantiels (rappelons qu'aucun usage n'est asservi aux heures d'insolation (le ballon ECS SdB ne le sera qu'à partir du 25 mars, et les locataires n'ont volontairement reçu aucune consigne particulière). La consommation excède de 37% la production. Mais la part des besoins journaliers couverte n'est que de 32 %.

La situation n'est pas très différente avec l'ensoleillement médian de janvier à ceci près que la totalité des besoins entre le lever et le coucher du soleil est cette fois couverte, mais évidemment toujours rien en dehors de cet intervalle :

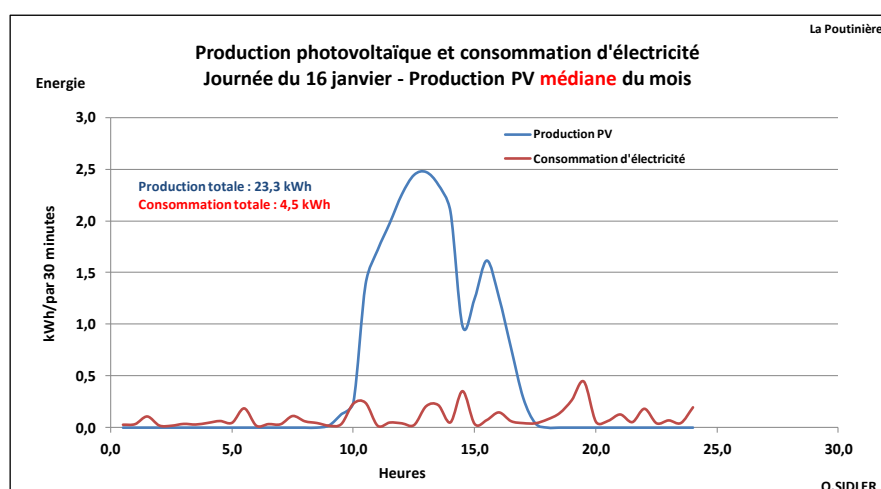


Figure 60 : Production photovoltaïque et consommation d'énergie le 16 janvier (insolation médiane du mois)

La consommation ne représente que 19% de la production. Mais la part des besoins journaliers couverte n'est que de 41%.

Enfin, même avec l'ensoleillement maximum le 29/1, cette part n'est que 50% (alors que les besoins ne représentent que 30% de la production).

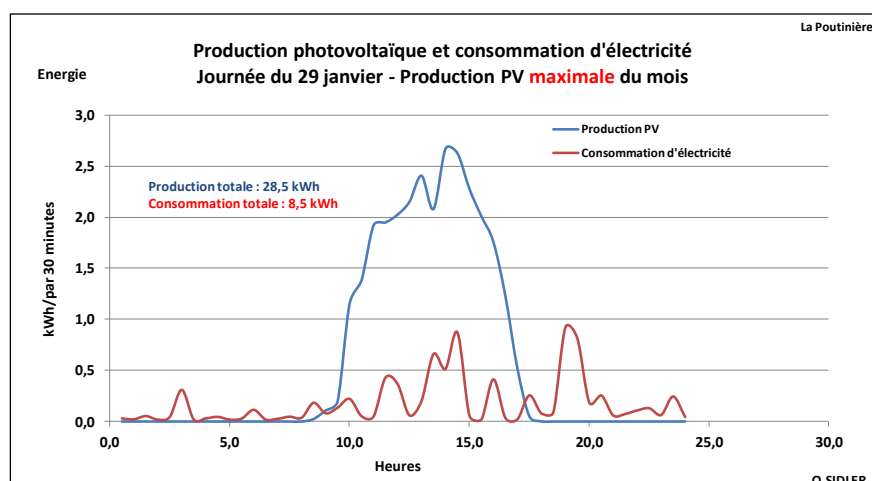


Figure 61 : Production photovoltaïque et consommation d'énergie le 29 janvier (plus forte insolation du mois)

A défaut d'une batterie de stockage transférant du jour vers la nuit une partie de la production, ce qui pose problème en hiver c'est donc la faible durée du jour (8h30').

Voyons donc ce qui se passe dans le mois de juin, là où les journées sont les plus longues.

Le 4 juin est la journée où la production énergétique a été la plus faible de tout le mois. C'est aussi une journée pendant laquelle la consommation a été relativement importante (chauffe-eau, LV, LL).

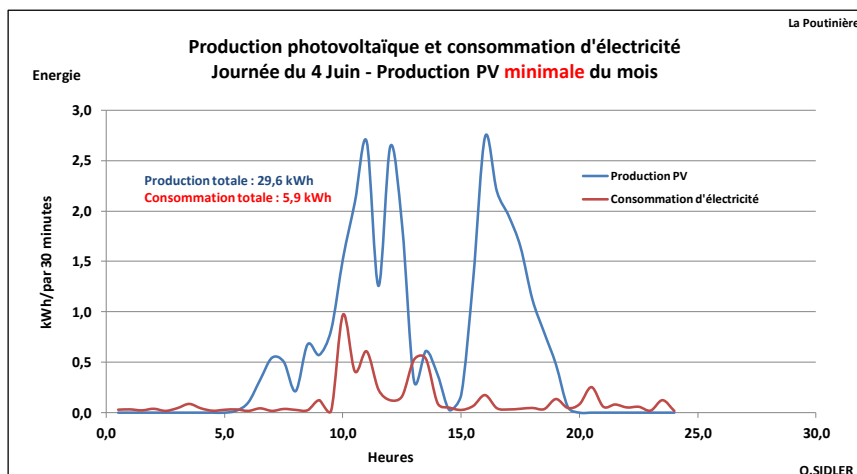


Figure 62 : Production photovoltaïque et consommation d'énergie le 2 juin (plus faible insolation du mois)

Globalement la consommation ne représente que 20% de la production de cette journée. Pendant la durée du jour et de l'insolation les besoins ont été couverts pour 94,6 %. Mais malgré cela, la part des besoins quotidiens n'a été couverte par la production qu'à hauteur de 76%. La durée de la période d'insolation est de 15h.

Il reste donc à examiner le cas de la journée la plus ensoleillée du mois : le 11 juin. Pas un nuage n'a parcouru le ciel. Les besoins ne sont pas très importants ce jour là.

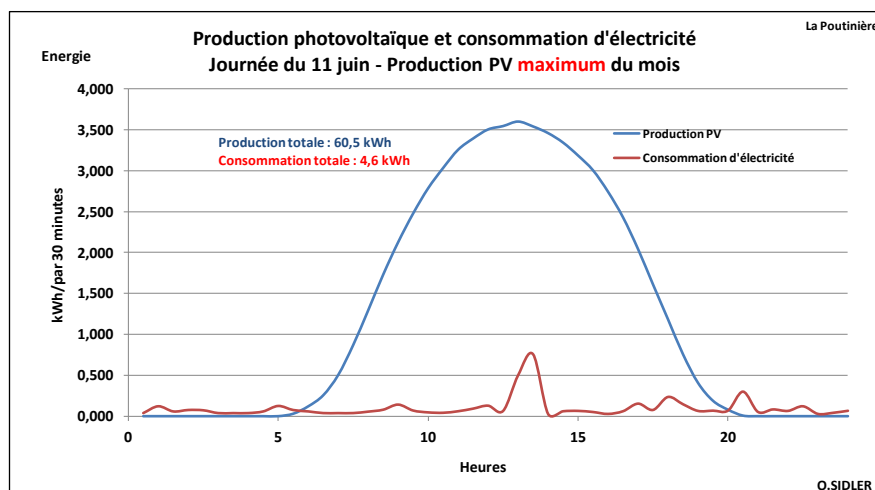


Figure 63 : Production photovoltaïque et consommation d'énergie le 11 juin (plus forte insolation du mois)

La consommation, avec 4,6 kWh, ne représente que 7,6 % de la production très importante de cette journée. Pendant la durée du jour et de l'insolation les besoins ont été couverts pour 98,7 %. Mais la part de la consommation journalière qui a été couverte par la production n'est que de 70%.

Il faut conclure qu'en été la production est tellement importante que toute la consommation pendant la période d'insolation, quel que soit son niveau et pratiquement quel que soit celui de l'insolation, sera couverte par la production. Seuls les besoins en dehors des périodes d'insolation ne sont pas du tout couverts.

7 - 3 Bilan annuelle en puissance

Le bilan en énergie est séduisant, très flatteur pour cette maison, mais les exemples précédents montrent que la question importante, en l'absence de batterie, est la simultanéité de l'offre et de la demande de puissance.

La quantité d'énergie obtenue en comptabilisant toutes les séquences (au pas de temps de 30') de consommation couverte en tout ou partie par une production PV au même moment, est de **1 034 kWh, soit 55% des besoins en énergie annuels. C'est la quantité « auto consommée » dans cette maison**, tout le reste de la production, soit 11 473 kWh/an, est le surplus qui serait vendable au réseau.

Il faut noter que si la charge du ballon ECS salle de bain avait été asservie dès le 1^{er} janvier, on aurait augmenté de façon importante cette part autoconsommée d'environ 90 kWh et elle **vaudrait 1 125 kWh ce qui représenterait 60% de la consommation**, sans pour autant que les locataires aient en aucune façon chercher à faire fonctionner leurs appareils lors des périodes ensoleillées.

7 - 4 Couverture des besoins en eau chaude sanitaire

L'analyse peut se faire par comparaison au pas de temps de 30 minutes des quantités d'énergie absorbées par le chauffe-eau et produites par le PV (Enedis ne fournit effectivement que les informations au pas de temps de 30'). Sur l'année, la couverture photovoltaïque de l'ECS des salles d'eau est de 79,1%. Mais à partir du 25 mars la charge du ballon a été asservie à une horloge ne l'autorisant à fonctionner que de 12 à 16h. Entre le 25/3 et le 31/12 **la couverture solaire est de 95,2 %**. Elle est encore de 90,3% entre le 31/10 et le 31/12. Mais entre le 1/1 et le 24/3 (donc hors asservissement par horloge) le taux de couverture n'est que de 38%, ce qui atteste de l'intérêt de la programmation. **A l'échelle de l'année on sera donc désormais entre 93 et 95% de couverture des besoins ECS du ballon salles d'eau par la production photovoltaïque.**

Il est à noter que cette approche est très légèrement majorante car il peut arriver que la puissance moyenne sur 30' délivrée par le solaire soit supérieure à la puissance de la production ECS, mais qu'au cours des 30 minutes il y ait de courtes séquences pendant lesquelles la puissance solaire est inférieure à la puissance de la résistance électrique.

Une autre approche, cette fois très minorante, consiste à examiner la question sous l'angle double de la couverture énergétique et de la puissance nécessaire : on ne comptabilise aucun apport solaire pour un intervalle de 30' si la puissance moyenne du solaire est inférieure soit à la résistance du ballon salles d'eau soit à la somme des résistances des deux ballons lorsqu'ils fonctionnent simultanément. Ce faisant on ne tient pas compte des moments, au cours des 30 minutes, pendant lesquels la puissance PV est néanmoins ponctuellement supérieure à la puissance de la ou des résistances. Mais au moins cela permet de disposer d'une borne inférieure, fût-elle très minorante.

Les résultats de ces deux approches figurent dans le tableau récapitulatif suivant :

Périodes	1/1 au 24/3	25/3 au 31/12	1/10 au 31/12	Année
Conso ECS	121	310	121	431
Prod PV	46	295	110	341
Taux couverture	38,0%	95,2%	90,3%	79,2%
Prod PV avec Puis PV > Pecs	32	273	93	305
Taux couverture	26,1%	88,3%	76,2%	70,8%

En kWh

Figure 64 : Couverture des besoins du ballon ECS salle de bains par la production photovoltaïque

On constate que le taux de couverture solaire se situe donc entre un minimum minimorum de 88% et une valeur maximum de 95% pour la période pendant laquelle le ballon a été asservi à l'horloge, et que sur l'année entière il se situe entre 71 et 79%. On observe aussi que durant les 3 mois où la charge se faisait au fil du temps, le taux de couverture se situe entre 26 et 38%. **On peut en conclure que l'asservissement de la charge des ballons ECS au créneau 12-16 h est très intéressant du point de vue de l'utilisation de l'énergie solaire.**

L'analyse du taux de couverture pour le chauffe-eau en cuisine, qui fonctionne sans programmation, va confirmer ce qui précède. Le taux de couverture solaire n'est que de 51,8% (analyse en énergie). L'analyse en puissance montre que la charge au fil du temps a un très fort impact pour cet usage comme le montre le tableau de synthèse suivant :

Périodes	1/1 au 24/3	25/3 au 31/12	1/10 au 31/12	Année
Conso ECS	72	191	86	264
Prod PV	35	101	39	136
Taux couverture	48,7%	52,9%	45,5%	51,8%
Prod PV avec Puis PV > Pecs	22	71	24	93
Taux couverture	30,1%	37,2%	27,6%	35,3%

En kWh

Figure 65 : Couverture des besoins du ballon ECS évier par la production photovoltaïque

L'usage de l'eau chaude sur l'évier s'effectuant pour une bonne part en soirée, le taux de couverture solaire avec une charge au fil du temps ne peut pas être très bon et la recherche du minimum minimorum par l'analyse des puissances conduit à estimer que le taux de couverture solaire de l'usage ECS cuisine se situe entre 35 et 52%.

Il serait judicieux d'asservir également le ballon cuisine à l'horloge, ou plutôt à une seconde horloge afin de décaler les appels de puissance. Mais malheureusement son volume (15 litres) est insuffisant pour permettre un fonctionnement avec une seule, ou même deux charges par jour.....

Globalement, en considérant l'ensemble de la production ECS, la couverture solaire est de 68,7% par l'analyse en énergie et de 57,3% par l'approche en puissance.

7 - 5 Impact de l'ajout d'une batterie électrique sur le degré d'autonomie

L'autonomie totale d'une maison n'est certainement pas l'optimum économique, sauf bien sûr s'il s'agit d'un site isolé. On peut toutefois se demander quelle serait la capacité nécessaire d'une batterie permettant d'éviter absolument tout recours au réseau. L'approche proposée ici reste limitée par la disposition au pas de 30 minutes de la production photovoltaïque....

L'approche a été conduite en supposant que le rendement charge/décharge de la batterie était globalement de 75%. Autre hypothèse : au 1^{er} janvier la batterie est quasiment vide puisqu'on suppose que sa charge n'est qu'à 5% de sa capacité. Le bilan s'établit au pas de temps de 30' sur l'ensemble de l'année. On peut ainsi suivre l'état de charge de la batterie en permanence. Il faut qu'à tout moment de l'année la charge reste positive.

Dans le cas de cette maison, avec le mode d'utilisation des appareils qui n'est pas du tout optimisé en fonction de l'ensoleillement (hormis la charge du ballon ECS principal), il apparaît qu'il **faudrait disposer d'une batterie de 29 kWh pour parvenir à l'autonomie totale**. Le graphique suivant montre comment évolue la charge de la batterie au cours de l'année :

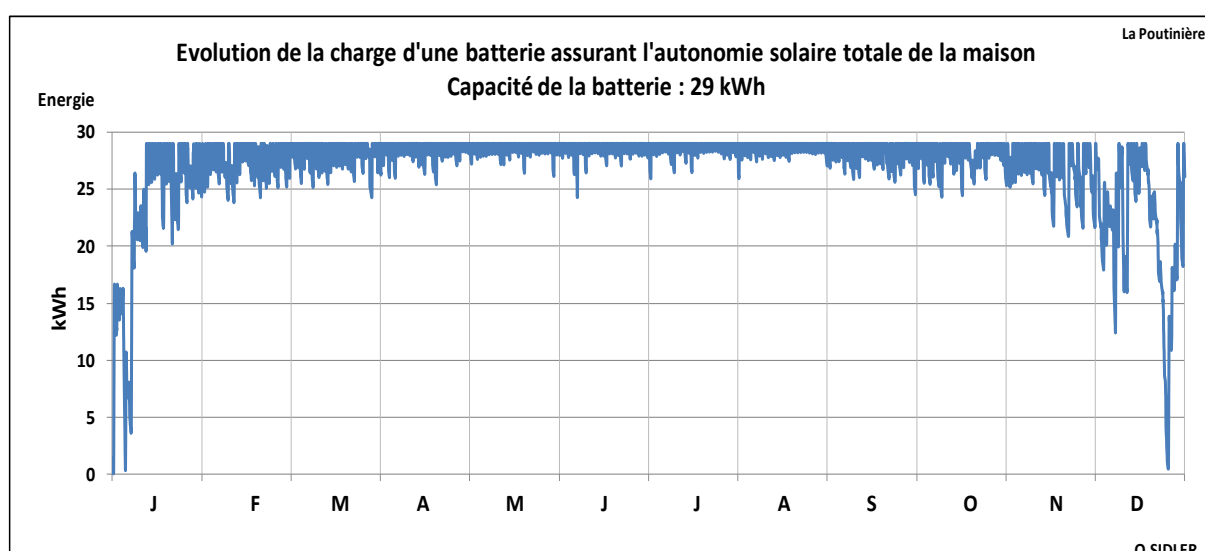


Figure 66 : Evolution au cours de l'année de la charge d'une batterie de 29 kWh assurant l'autonomie totale de la maison

Le dimensionnement de la batterie est uniquement dû aux conditions de très faible ensoleillement et de neige rencontrées surtout fin décembre (succession de 42 h sans aucune production solaire). Mais il est certain que tout le reste de l'année la capacité de la batterie est très surdimensionnée : 4 kWh pourraient suffire pendant 10,5 mois de l'année.

Il est donc légitime de se demander quel serait le degré d'autonomie atteint avec différentes capacités de batterie de stockage.

Le graphique de la figure 67 met en évidence qu'il ne faut pas rechercher l'autonomie complète, et qu'avec une batterie dont la capacité ne serait que le tiers de celle permettant l'autonomie totale, on dispose d'un degré d'autonomie d'environ 97% : il ne resterait alors plus que 60 kWh à prélever sur le réseau. Le graphique montre aussi quelle puissance maximum résiduelle subsiste à chaque fois. Le caractère un peu erratique de cette courbe de puissance tient aux spécificités des profils de consommation et de production d'électricité dans cette maison : certains pics de puissance ne disparaissent que lorsqu'un niveau de capacité batterie est atteint, d'où ces

« plateaux » dans la courbe. Sur le fond, il est intéressant d'observer que, dans le cas spécifique de cette maison, le besoin en puissance est toujours inférieur à 2,5 kW. Ce qui est une contribution demandée au réseau relativement faible.

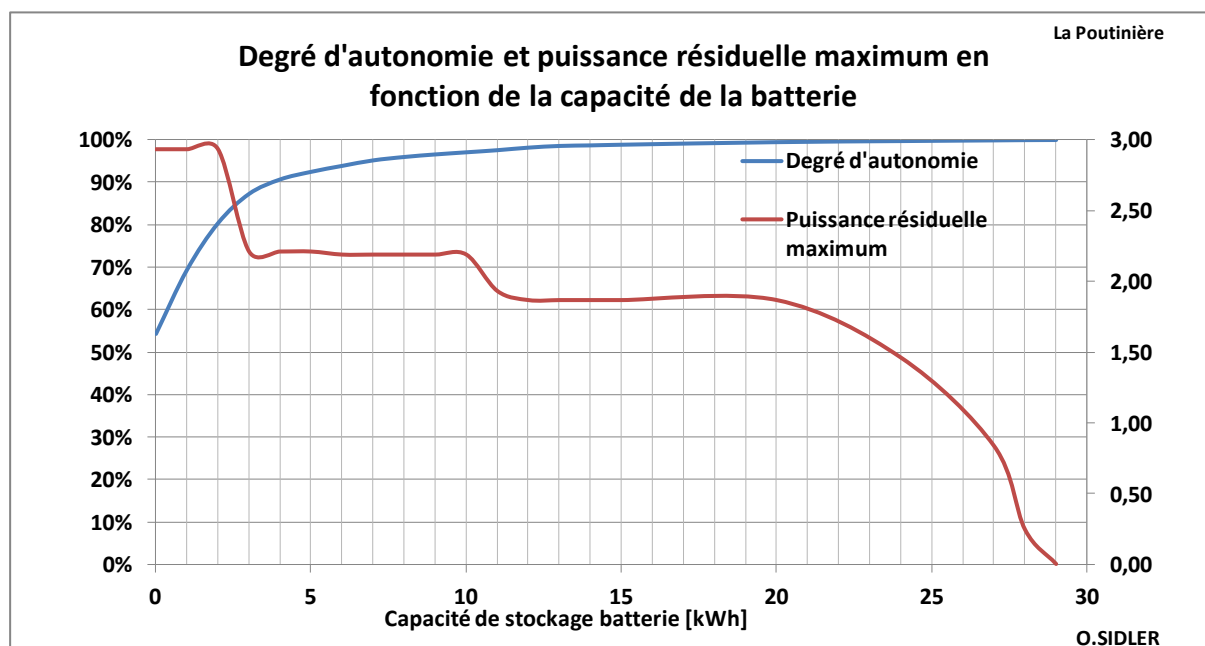


Figure 67 : Degré d'autonomie et puissance résiduelle en fonction de la capacité de la batterie

Le graphique qui suit illustre l'évolution de la capacité d'une batterie de 11 kWh au cours de l'année :

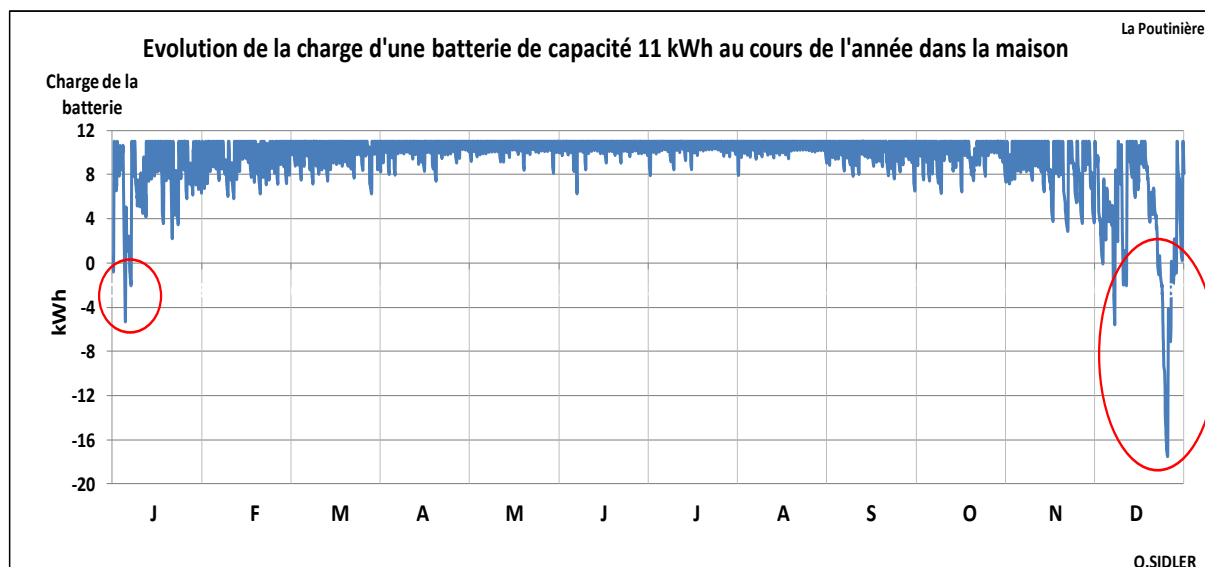


Figure 68 : Evolution au cours de l'année de la charge d'une batterie de 11 kWh assurant une autonomie de 97,6% de la maison

Il ne subsiste que deux périodes pendant lesquelles la capacité de la batterie est insuffisante, en janvier et surtout en décembre. En janvier le déficit de stockage a lieu pendant 23h, et en décembre pendant 176h. Mais avec des besoins en puissance complémentaire inférieurs à 2 kW. En énergie la charge résiduelle à prélever sur le réseau en un an est de 45 kWh.

Mais avec la nature des données collectées (consommations au pas de temps de 10'), il est intéressant d'explorer des situations différentes de celle de cette maison en faisant varier la puissance installée (et en supposant que l'énergie produite est dans le même rapport de variation que celui de la puissance installée). Pour étudier l'impact d'une puissance installée de 3 kWc il suffit donc de diviser par 3 les productions à 30' obtenues sur l'installation actuelle équipée de 9 kWc.

On prend la consommation telle qu'elle a été observée, donc sans optimisation du comportement des usagers au regard du solaire, et on peut ainsi déterminer les taux d'autonomie en énergie et en puissance en fonction de la puissance installée :

Autonomie en l'absence de batterie										
PV kWc	1	1,33	2	3	4	5	6	7	8	9
Autonomie en énergie	75,3%	100,0%	100,0%	100,0%	100,0%	100%	100%	100%	100%	100,0%
Autonomie en puissance	32,7%	37,4%	43,4%	48,0%	50,5%	52,1%	53,2%	54,2%	54,9%	55,5%

Figure 69 : Impact de la puissance PV installée sur le taux d'autonomie en énergie et en puissance

Sur cette maison il suffirait d'une puissance installée de 1,33 kWc pour assurer l'autonomie énergétique. Mais le vrai critère de l'autonomie (ou de l'autoconsommation) étant l'autonomie en puissance, le taux de celle-ci n'est alors que de 37,4%. Et, comme on l'a vu précédemment, ce taux ne dépasse pas 55% avec 9 kWc installés. Augmenter l'autonomie en puissance passe donc obligatoirement par un stockage sur batterie.

Les mesures collectées permettent cette simulation qui reste toute théorique vu le niveau de capacité des batteries atteint dans certains cas :

Capacité de batterie pour différents niveaux d'autonomie										
PV kWc	1	1,33	2	3	4	5	6	7	8	9
C batterie auto 100% (kWh)	-	415	259	168	114	72	47	32,5	30	28
C batterie auto 90% (kWh)	-	302	183,5	92	36	18	11,3	5,9	4,35	3,8
C batterie auto 80% (kWh)	-	257	135	47	14	4,1	2,9	2,5	2,2	2
Capacité en kWh										

Figure 70 : Capacité de batterie nécessaire pour atteindre un certain niveau d'autonomie, en fonction de la puissance PV installée

Il est clair qu'une autonomie de 100%, il est vrai avec un comportement des usagers indifférent à l'ensoleillement, n'est pas optimum, et souvent irréalisable vu les niveaux de capacité de batterie nécessaires.

On est alors tenté de rechercher une solution de compromis au niveau de l'investissement. En toute rigueur, un calcul économique devrait intégrer la vente du courant produit au-delà de l'autoconsommation. Mais si ce coût (10 cts) était raisonnable au moment de la signature du contrat pour cette maison, il ne l'est plus aujourd'hui avec un prix d'achat de 4 cts/kWh. Le tableau qui suit se contente donc uniquement de faire une évaluation grossière du coût d'investissement sur la base d'un coût de 2 000 € TTC/kWc et de 150 € TTC/kWh de batterie :

Coût des différentes solutions (€ TTC)										
PV kWc	1	1,33	2	3	4	5	6	7	8	9
Autonomie 100%		64 910	42 850	31 200	25 100	20 800	19 050	18 875	20 500	22 200
Autonomie 90%		47 960	31 525	19 800	13 400	12 700	13 695	14 885	16 653	18 570
Autonomie 80%		41 210	24 250	13 050	10 100	10 615	12 435	14 375	16 330	18 300
€ TTC	Hypothèses : 2 000€/kWc et 150 €/kWh									

Figure 71 : Coût d'investissement des différentes solutions

Il apparaît des solutions d'investissement optimales : plus le niveau d'autonomie souhaité est faible, plus la puissance PV et la capacité nécessaire de batterie se réduisent. Il s'ensuit que dans le cas de la Poutinière, 80% d'autonomie serait atteint avec l'installation de seulement 3 kWc et 14 kWh de batterie. Coût d'investissement : 10 100 € TTC.

Mais une autonomie de 80 % n'a guère d'intérêt. Si on s'intéresse à l'autonomie totale, l'optimum apparaît avec l'installation de 7 kWc et 32,5 kWh de batterie. Coût : 18 875 € TTC.

Ce qui est désolant aujourd'hui, c'est qu'avec les nouveaux tarifs d'achat de l'électricité mis en place par le gouvernement en 2025, et en prenant en compte les économies de l'autoconsommation ainsi que la vente du surplus produit, les temps de retour, quelle que soit la solution adoptée, sont de l'ordre de 25 ans, c'est-à-dire de la durée de vie supposée des panneaux photovoltaïques. Si on voulait tuer une filière on ne s'y prendrait pas mieux !

Alors que pointent à courte échéance de nouveaux types de batteries stationnaires (sans lithium !) pour des coûts en chute libre, on ne comprend pas les efforts que fait le gouvernement pour se passer de l'énergie photovoltaïque dans un contexte où la lutte contre le changement climatique va conduire à des besoins d'électricité massifs dans la décade à venir, alors qu'à part l'éolien et le photovoltaïque, aucune autre source d'électricité ne sera disponible, au mieux avant le début des années 2040.... Et elles sont aussi en train de devenir les solutions les moins chères et les plus fiables. Sans compter qu'atteindre ou approcher l'autonomie (tout en étant raccordé au réseau) permettrait de réduire fortement les coûts de renforcement du réseau puisque les usagers seraient beaucoup moins demandeurs.

Enfin, considérant le cas de la Poutinière, si le contrat d'achat du courant avait été conclu sur les bases actuelles de 4 cts/kWh, compte tenu de la part autoconsommée, de celle vendue et de celle achetée au réseau, le bénéfice annuel pour le propriétaire occupant serait de 552 € et le temps de retour de....30,7 ans.

Enfin, on va acheter 10 cts le kWh nucléaire à ses producteurs. Pourquoi ne pas acheter le kWh solaire à ce prix, ce qui ramènerait le temps de retour à 13,7 ans ? Ce n'est pas merveilleux, mais on n'est pas difficile.

8 – Les consommations d’eau

Les consommations d’eau par point de puisage sont en général très mal connues car l’instrumentation *a posteriori* reste compliquée et assez chère. Ici, les compteurs ont été posés lors de la construction, ce qui a permis de multiplier les points de mesure pour un coût relativement faible.

Chaque famille a ses habitudes, voire ses manies, concernant la consommation d’eau et celle-ci n’échappe pas à la règle. Il ne faut donc pas chercher à généraliser les résultats qui suivent, mais ils permettent néanmoins de fixer des ordres de grandeur intéressants.

8 - 1 Consommations annuelles et mensuelles par point de puisage

Le détail par point de puisage et par mois est le suivant :

	EF_WC	EF_ext	EF_evier	ECS_evier	EF_LV	ECS SdB	EF_LL	EF lavabo	EF Général
J	1 483	5	327	522	120	581	489	670	4 197
F	987	1	227	457	57	533	628	413	3 304
M	1 386	2	560	42	91	388	519	453	3 441
A	1 417	23	421	278	114	514	519	560	3 846
M	1 326	6	453	264	107	538	577	582	3 853
J	1 332	142	472	329	131	364	449	676	3 895
J	1 212	308	386	244	72	256	405	492	3 376
A	798	44	252	166	39	177	248	312	2 036
S	1 229	18	385	542	139	492	385	648	3 838
O	978	9	293	487	119	537	527	530	3 480
N	1 121	11	297	586	131	568	337	500	3 551
D	1 501	36	331	712	206	715	532	511	4 544
Année	14 770	605	4 404	4 629	1 326	5 663	5 615	6 347	43 361
	34,1%	1,4%	10,2%	10,7%	3,1%	13,1%	12,9%	14,6%	100,0%
En litre									

Figure 72 : Volumes d’eau soutirés par point de puisage et par mois

Les paragraphes qui suivent vont permettre de mieux mettre en évidence les informations de ce tableau.

La consommation annuelle totale d’eau est de **43,361 m³**. En supposant que la taille de la famille ait été de 4 personnes sur l’année, cela conduit à une consommation de **10,84 m³/pers/an**, soit aussi **32,0 l/j/pers** (en ne considérant que les 339 j/an de présence dans la maison). C’est très peu au regard des moyennes nationales qui circulent mais qui comptabilisent dans la « consommation d’eau à usage domestique » les petites entreprises.

Quant à la consommation d’eau chaude sanitaire elle s’élève à **10,292 m³** (à une température d’environ 50°C). Avec les mêmes hypothèses que précédemment, cela correspond à une consommation de **2,57 m³/pers/an**, soit aussi **7,6 l/j/pers** (toujours à 50°C).

Ce résultat est d’abord lié à la manière dont la famille vit et consomme, ainsi qu’à la nature de ses appareils ménagers pour le lavage et qu’à sa façon de les utiliser. Pour l’eau chaude sanitaire, les dispositions constructives mises en œuvre visant à rendre extrêmement proches les ballons et les points de puisage ont permis une réduction d’autant plus importante en valeur relative que les utilisateurs ont semble-t-il un comportement économe.

8 - 2 Structure de la consommation annuelle

Commençons par examiner la structure par point de puisage (fournie directement par les compteurs divisionnaires posés) :

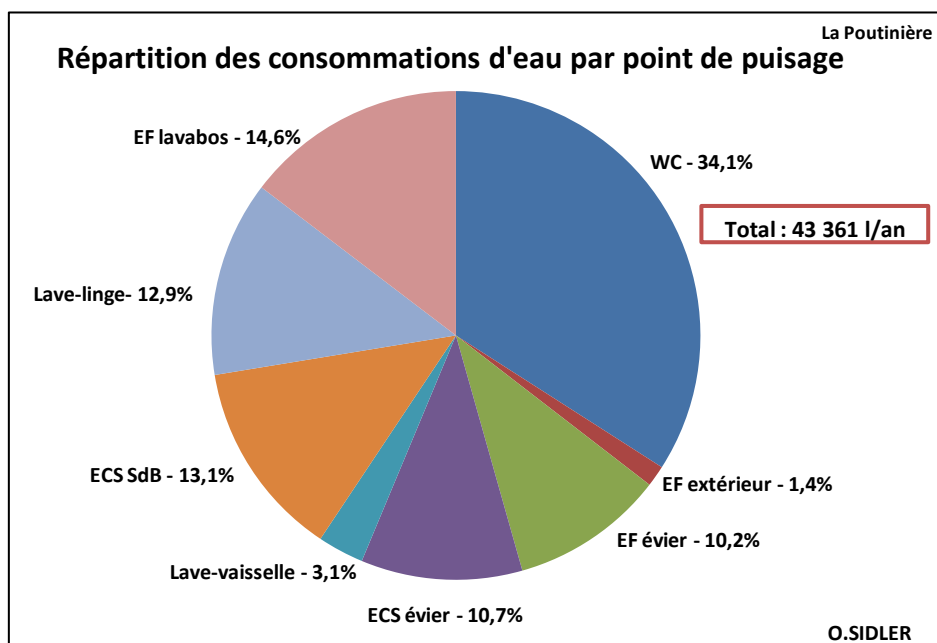


Figure 73 : Structure de la consommation d'eau par point de puisage

Chaque famille a probablement sa façon bien à elle d'utiliser l'eau. Néanmoins, on est frappé ici de découvrir l'importance relative de la consommation d'eau des WC : **34,1%** ! Le débat sur les toilettes sèches et leur intérêt trouve là toute sa justification.

Viennent ensuite l'eau froide aux lavabos des salles d'eau (14,6%), puis l'eau chaude des salles d'eau (douche et lavabos) avec 13,1%, le lave linge (qui est un modèle assez ancien et pas très économe) avec 12,9%, et enfin l'ECS sur l'évier (10,7%).

L'analyse par usage met à nouveau en avant le poids des WC.

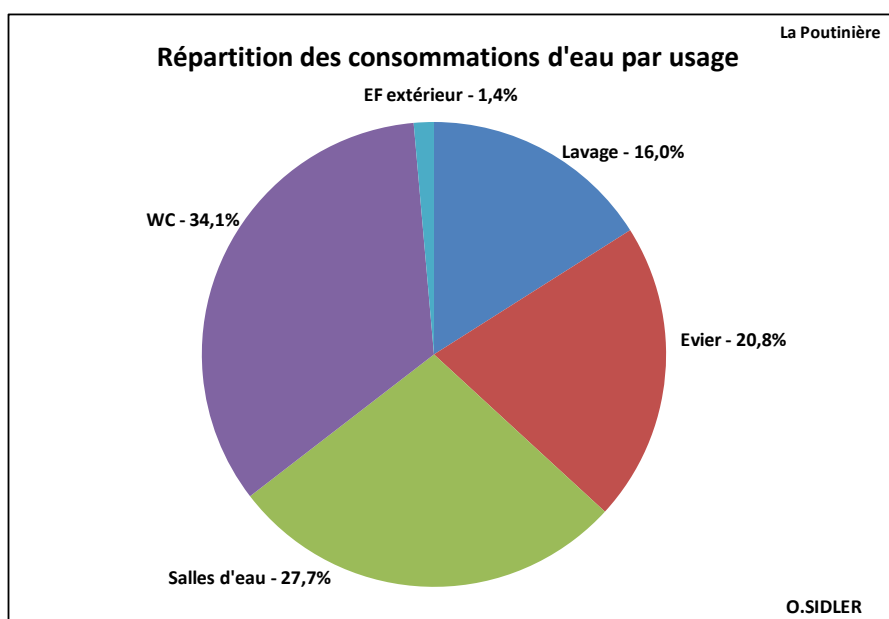


Figure 74 : Structure de la consommation d'eau par usage

On trouve ensuite l'eau utilisée pour la toilette (27,2%), puis celle hors lavage utilisée dans la cuisine (20,8%), et enfin les usages de lavage (16,0%).

La décomposition de l'usage par pièces est proche de la décomposition précédente :

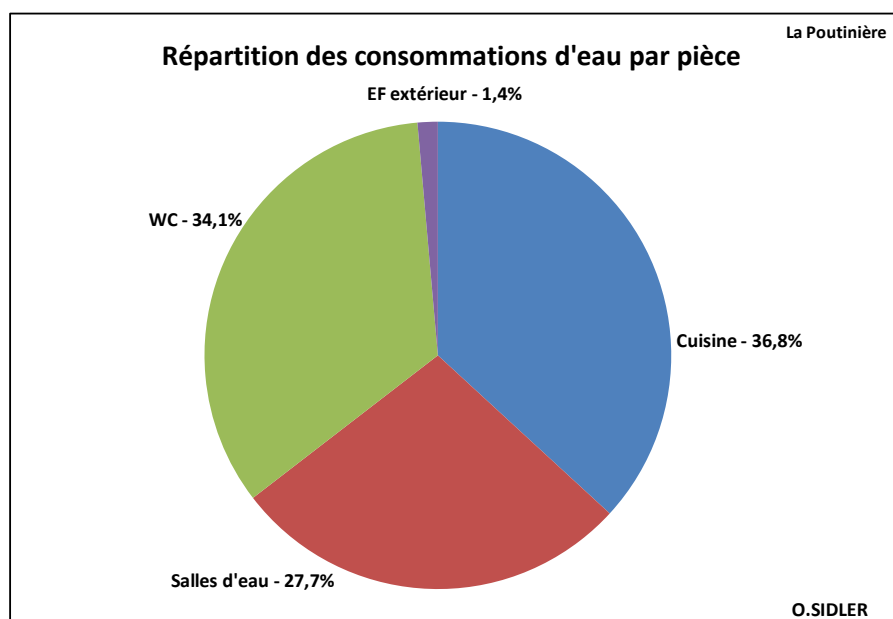


Figure 75 : Structure de la consommation d'eau par pièce

Cette représentation est la première dans laquelle les WC ne sont pas en première position ! C'est l'ensemble des activités en cuisine qui représente la principale consommation d'eau.

Enfin, le partage entre eau froide et eau chaude fait ressortir une consommation d'eau froide trois fois supérieure à celle d'eau chaude :

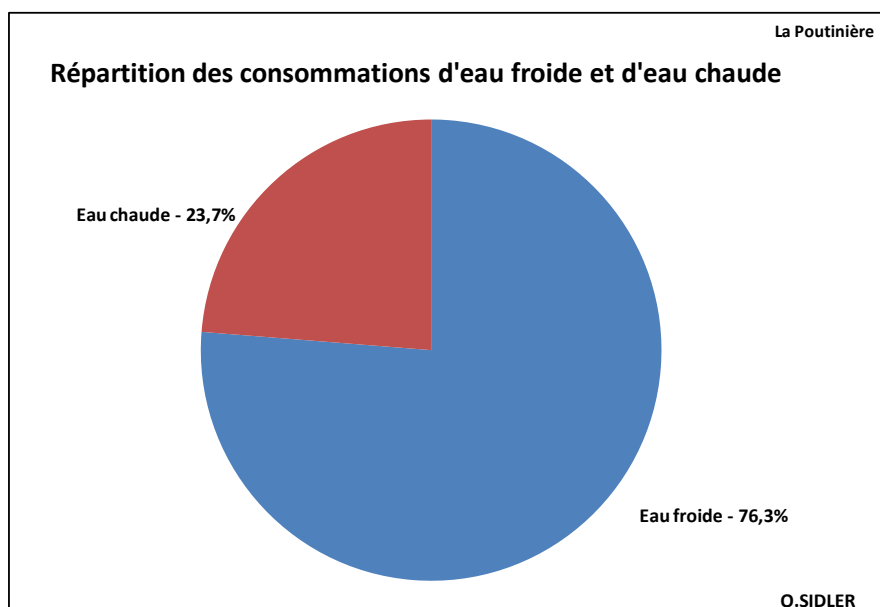


Figure 76 : Structure de la consommation entre eau froide et eau chaude

Enfin, les nombreux compteurs d'eau posés permettent des regroupements intéressants de consommation qui figure dans le tableau suivant :

Postes	Volume [l/an]
Totalité de l'eau consommée	43 361
Lave-vaisselle	1 326
Lave-linge	5 615
Total lavage	6 941
EF sur l'évier	4 404
EC sur l'évier	4 629
Total eau évier	9 033
EF pour les WC	14 770
EF Arrosage extérieur	605
EF sur les lavabos (salles d'eau)	6 347
EC dans les salles d'eau	5 663
Total eau dans les salles d'eau	12 010
Totalité de l'EF consommée comme telle	33 069
Totalité de l'EC	10 292
Totalité de l'EF en cuisine	11 345
Totalité de l'eau en cuisine (EF+EC)	15 974

Figure 77 : Divers regroupements des consommations d'eau

8 - 3 Saisonnalité au pas de temps du mois

Il est intéressant de voir si les consommations d'eau ont, comme les consommations d'énergie, un caractère saisonnier plus ou moins marqué. L'irrégularité du nombre d'occupants dans la famille rend cette analyse un peu plus délicate comme le démontre les profils qui suivent dont l'explication et la cohérence d'un usage à l'autre ne sont pas toujours vraiment évidentes.

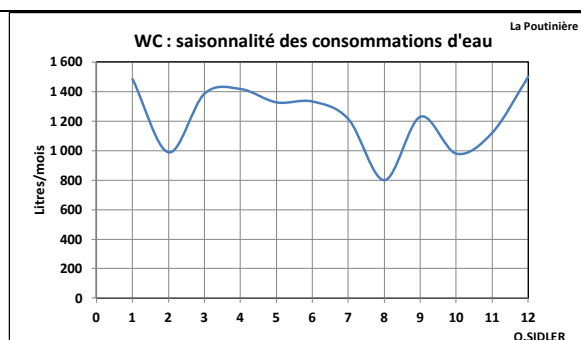


Figure 78 : Saisonnalité des WC

La consommation des WC est un bon indicateur de la présence. On observe ici trois creux caractéristiques des périodes d'absence pour vacances observées

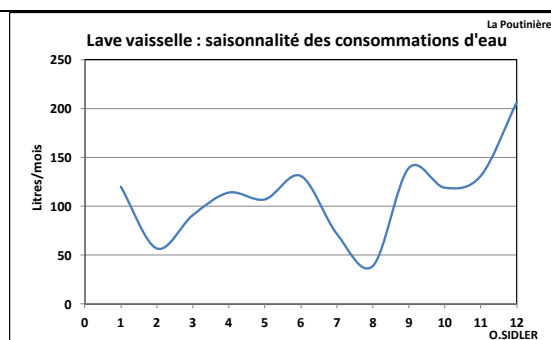


Figure 79 : Saisonnalité du lave-vaisselle

Le lave-vaisselle est plutôt utilisé quand on est nombreux. C'est un complément d'information. On retrouve les 3 creux correspondant aux absences.

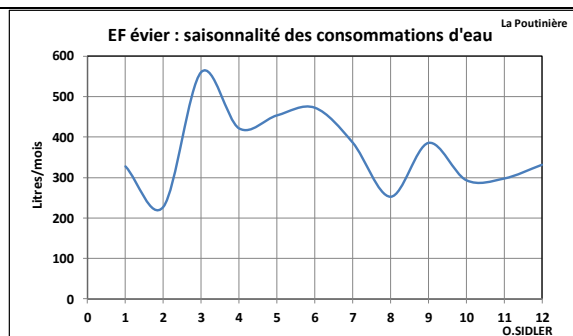


Figure 80 : Saisonnalité de l'EF s/évier

La consommation d'EF sur l'évier est aussi un bon indicateur, à la fois des absences et du nombre d'occupants (toujours les 3 creux caractéristiques)

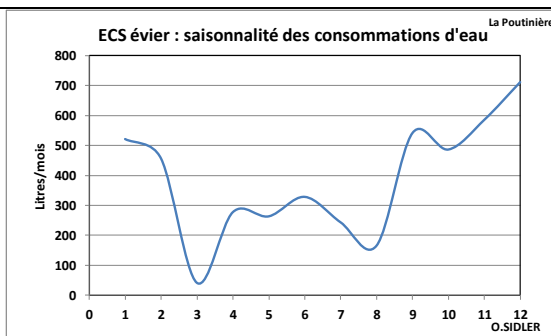


Figure 81 : Saisonnalité de l'EC s/évier

Ce profil devrait être proche de celui de l'EF sur l'évier. Difficile de comprendre pourquoi ce n'est pas le cas...

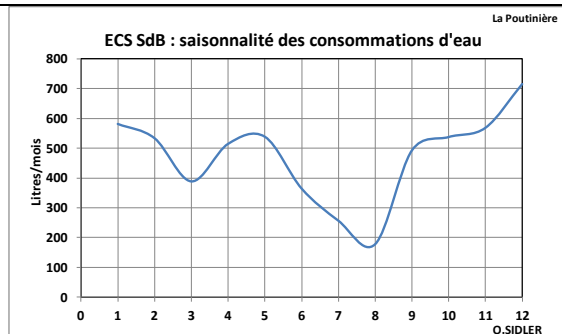


Figure 82 : Saisonnalité de l'eau chaude en SdB

Cette consommation est très liée à la présence et au nombre d'occupants. Concerne la consommation des lavabos et de la douche.

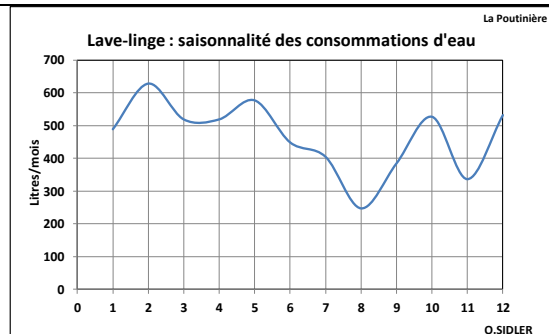


Figure 83 : Saisonnalité du lave-linge

Le lave-linge peut avoir une sensibilité saisonnière marquée puisque la nature été/hiver des vêtements change. Ici ce n'est pas évident...

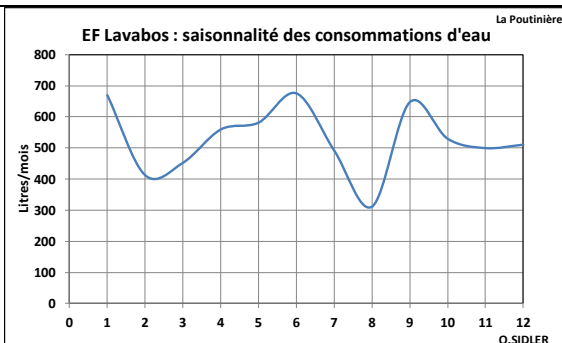


Figure 84 : Saisonnalité de l'EF des lavabos

N'est étonnamment pas très en phase avec la saisonnalité du poste ECS en salle d'eau...

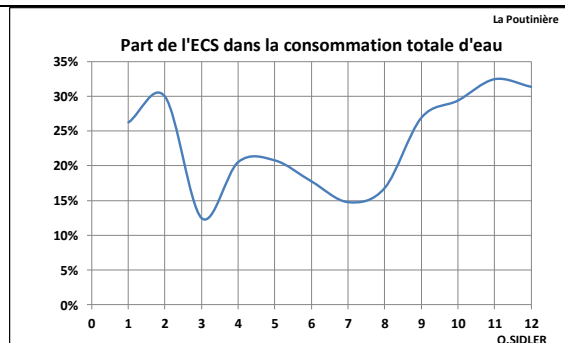


Figure 85 : Saisonnalité du rapport $EC/(EC+EF)$

La part de l'eau chaude dans la consommation totale d'eau est en principe très saisonnière : plus il fait chaud, moins on utilise d'eau chaude.

8 - 4 Fréquences cumulées des volumes puisés à 10'

Les compteurs d'eau mis en place transmettent leurs index toutes les 10'. Le poids des impulsions est de 1 litre. On dispose donc d'une information pouvant renseigner, pour certains usages, sur la manière dont l'eau est consommée. Mais il aurait fallu un pas de temps de 1' pour avoir une information plus fine spécifique à chaque puisage....

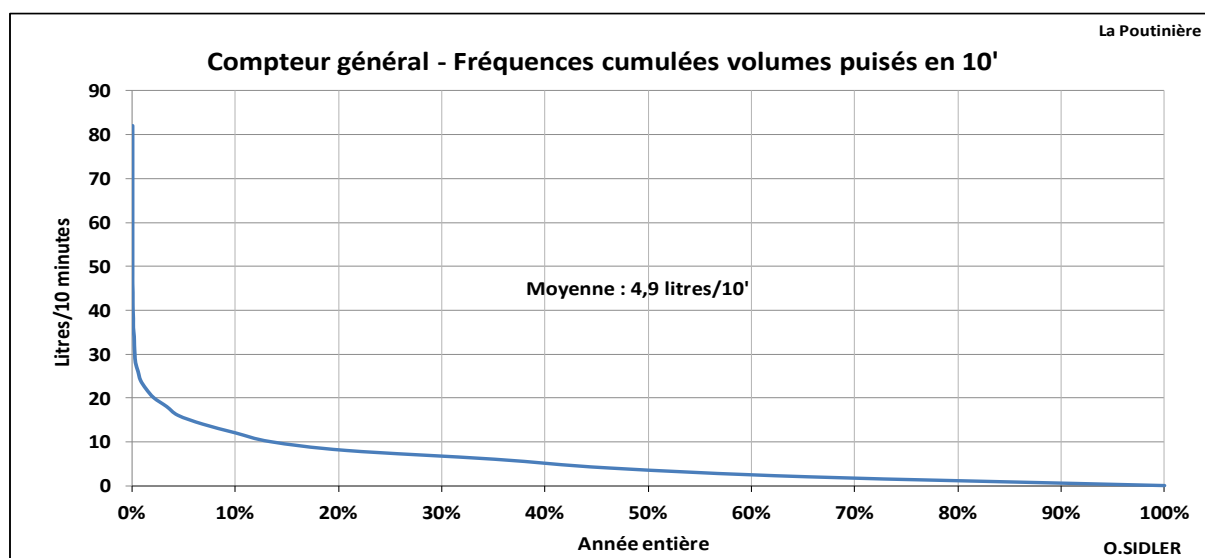


Figure 86 : Alimentation générale eau - Fréquences cumulées des volumes puisés à 10'

Il y a eu durant l'été un gros puisage de 82 litres en 10 minutes sur le robinet extérieur (remplissage d'une petite piscine ?) ce qui a déformé la courbe des fréquences cumulées. Car le puisage médian se situe entre 3,5 et 4 litres en 10', la moyenne de tous les puisages étant quant à elle de 4,9 litres/10'. Seuls 13,4% des puisages sont supérieurs à 10 litres/10' (60 litres/h). Comme pour l'électricité, ce sont quelques très rares moments dans l'année qui créent les phénomènes surdimensionnés de pointe.

Les fréquences cumulées des volumes puisés par les WC sont moins surprenantes :

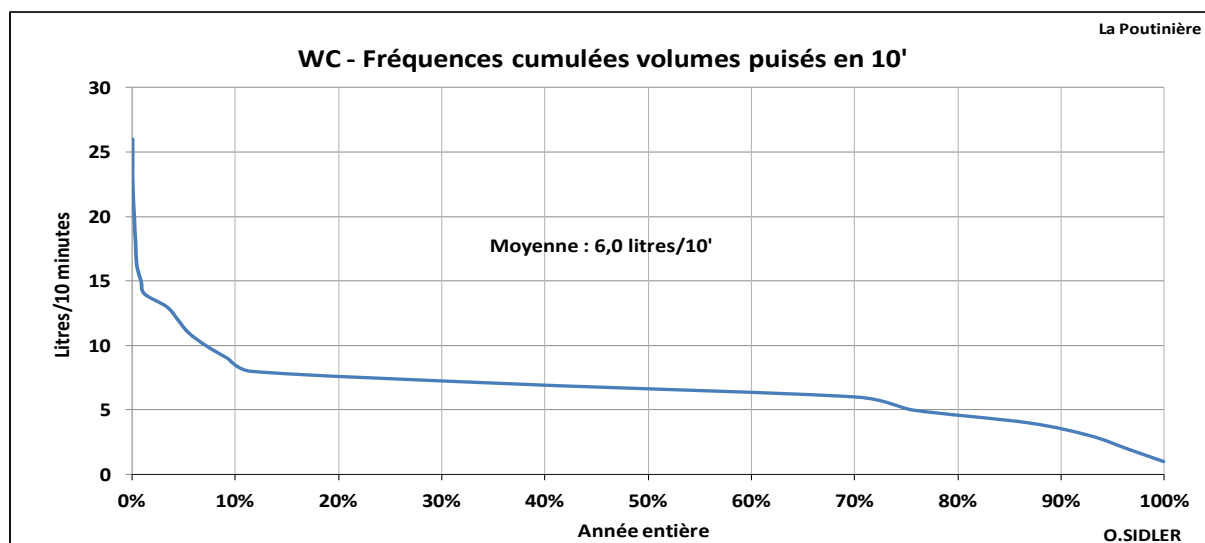


Figure 87 : WC - Fréquences cumulées des volumes puisés à 10'

Le réservoir est équipé d'un dispositif de chasse 3/6 litres. On voit que moins de 20% des puisages concernent un puisage unique de 3 litres ou moins, mais que d'autres puisages de 3 litres ont lieu, en plus d'autres puisages, dans un même intervalle de 10' (entre 0 et 10%). Mais il est difficile de dire quel en est le pourcentage. En revanche au moins 60% des puisages sont des puisages uniques de 6 litres.

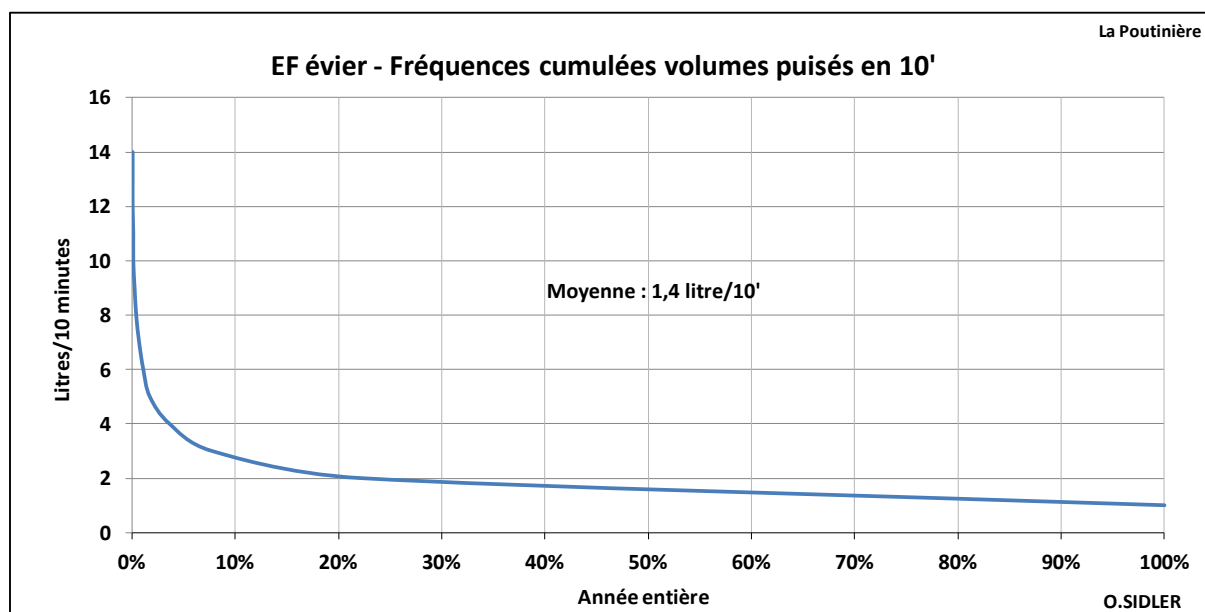


Figure 88 : Eau froide évier - Fréquences cumulées des volumes puisés à 10'

Pour l'eau froide sur l'évier 96,4% des puisages (en 10') sont inférieurs à 4 litres. Le puisage médian est de 1,6 litre et le puisage moyen de 1,4 litre.

Les valeurs sont très différentes sur l'eau chaude de l'évier :

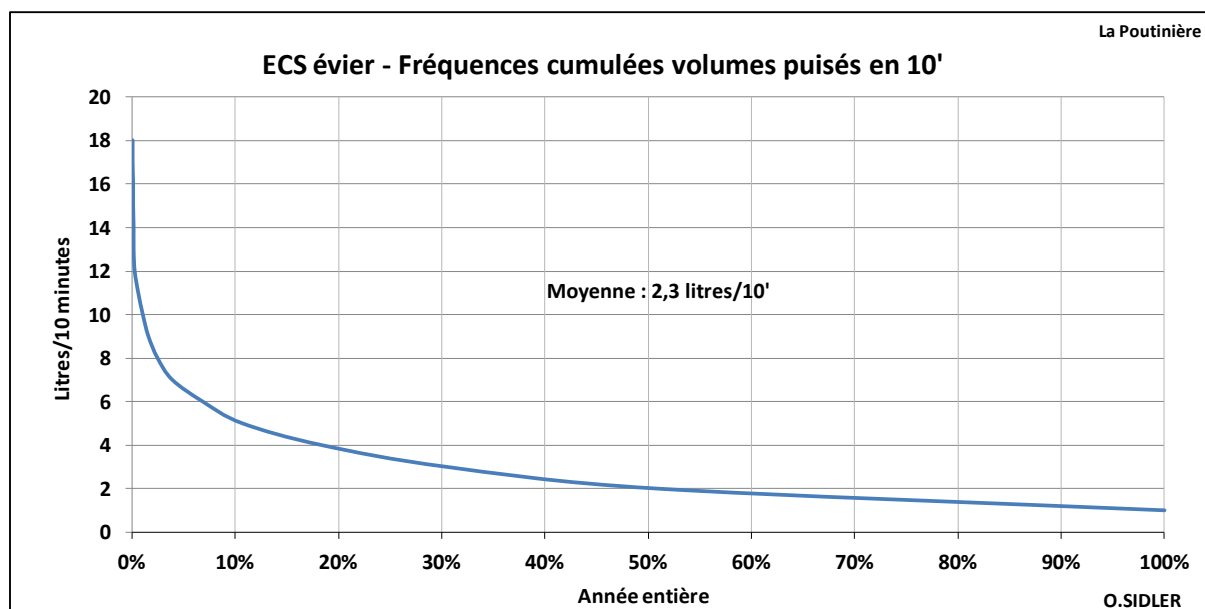


Figure 89 : Eau chaude évier - Fréquences cumulées des volumes puisés à 10'

96,1% des puisages à 10' sont inférieurs ou égaux à 7 litres. Le puisage médian est de 2 litres et le puisage moyen de 2,3 litres. Il faut préciser que la température de l'eau chaude a été abaissée à environ 48°C par l'utilisateur (afin de réduire les pertes), ce qui limite le

besoin de mitigeage avec de l'eau froide (on peut directement utiliser l'eau chaude sans avoir besoin de la refroidir).

Le lave-vaisselle utilisé par les locataires est un appareil plutôt performant utilisant peu d'eau. La courbe des fréquences cumulées en atteste avec des puisages assez réduits :

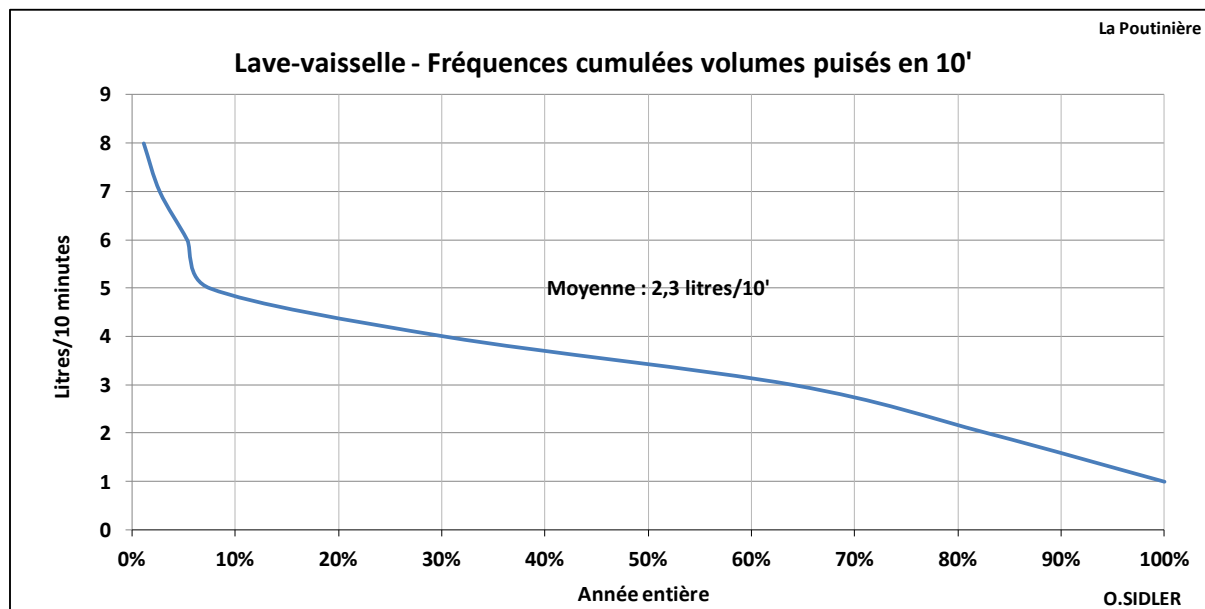


Figure 90 : Lave-vaisselle - Fréquences cumulées des volumes puisés à 10'

92,5 % des puisages sont inférieurs à 5 litres. Le prélèvement médian est de 3,4 litres et le prélèvement moyen de 2,3 litres par 10'.

Le lave-linge est en revanche un appareil assez ancien et très peu économe comme en témoigne le graphique suivant :

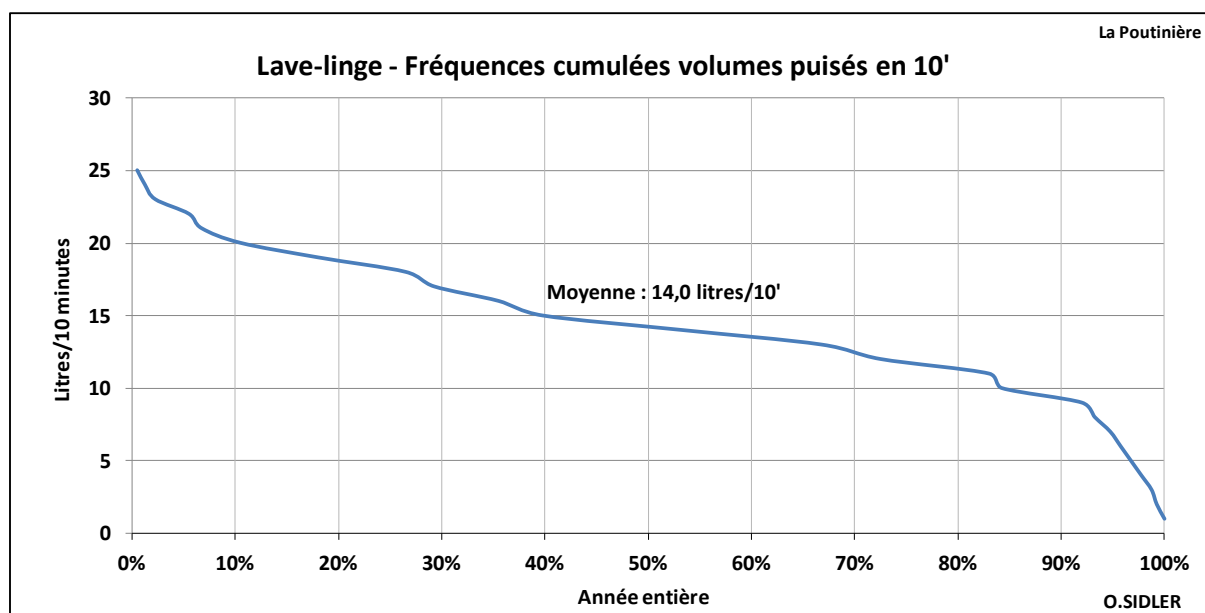


Figure 91 : Lave-linge - Fréquences cumulées des volumes puisés à 10'

Seuls 8% des puisages à 10' sont inférieurs à 9 litres et 40% sont supérieurs à 15 litres. Le puisage médian est de 14,2 litres et le puisage moyen de 14,0 litres. Cette famille fera d'importantes économies d'eau (et d'énergie) lorsqu'elle changera de lave-linge.

En salles d'eau l'usage de l'eau chaude entre lavabos (sans récupération de chaleur) et la douche (avec récupération de chaleur sur les eaux grises) fait apparaître une courbe de fréquences cumulées presque linéaire pour 90% des puisages les plus faibles (c'est-à-dire inférieures à 11 litres sur 10'). On ne peut donc guère tirer de leçon particulière de ce profil.

Le puisage médian est de 5 litres et le puisage moyen de 5,4 litres en 10'.

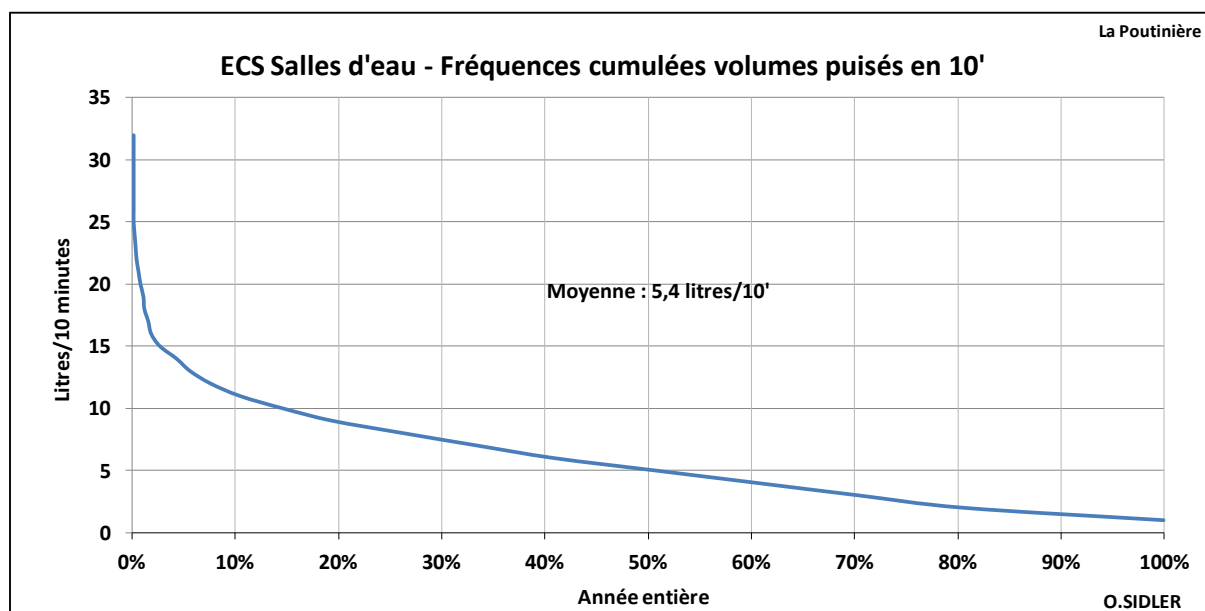


Figure 92 : ECS des salles d'eau - Fréquences cumulées des volumes puisés à 10'

Enfin, les puisages d'eau froide dans les salles d'eau : on conçoit qu'ils soient assez faibles, à la fois parce qu'ils servent essentiellement au mitigeage (or l'ECS n'est stockée qu'entre 48 et 56°C) et que les robinets sont munis de limiteurs de débit. Ainsi seuls 6,2% des puisages concernent des volumes supérieurs à 5 litres. Le puisage médian est de 1,6 litre et le puisage moyen de 1,7 litre en 10'.

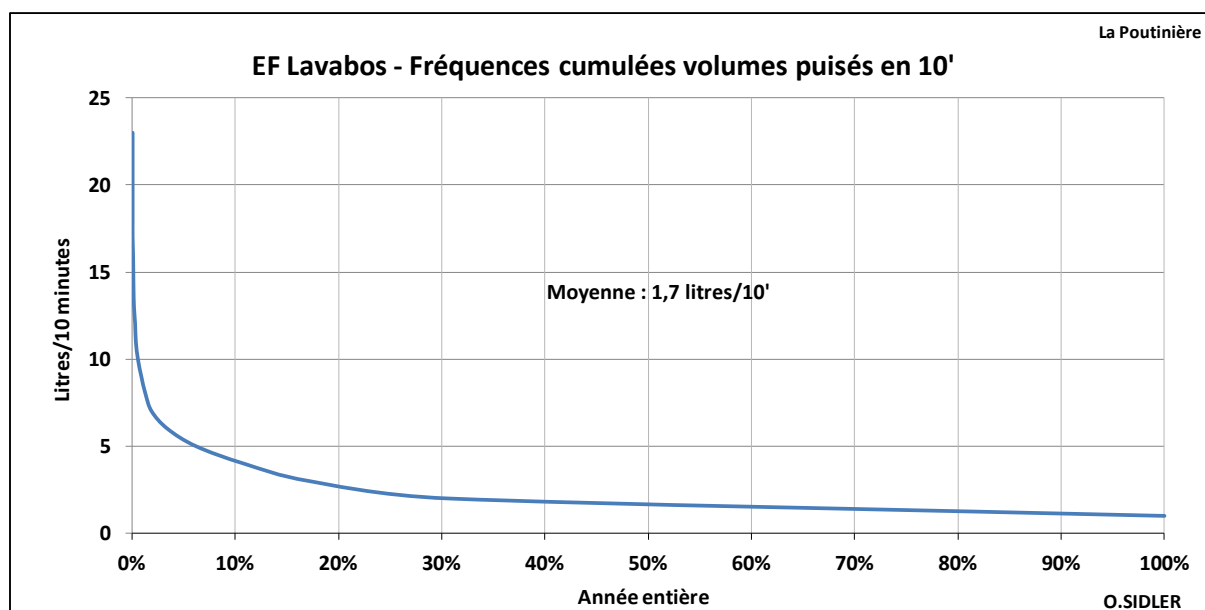


Figure 93 : EF des salles d'eau - Fréquences cumulées des volumes puisés à 10'

9-Consommation du poste feux de cuisson

Afin de réduire le niveau des puissances appelées le choix a été fait de faire la cuisson avec des bouteilles de propane. Il s'agit bien sûr en l'état d'un gaz à effet de serre non renouvelable, mais il apparaît déjà sur le marché des bouteilles contenant 20% de bio propane, et prochainement des bouteilles entière au bio propane.

En attendant cette option, la consommation de propane pour la cuisine a été, selon les locataires de 4 bouteilles de 13kg dans l'année. Une bouteille contient 165 kWh d'énergie. Au total **le poste cuisine a donc consommé 660 kWh ce qui correspond à une émission de GES de 178 kg CO₂.**

C'est, en terme d'émission de GES, le point faible de cette maison, mais ce problème sera réglé avec l'utilisation du bio propane puisque celui-ci est produit à partir de déchets organiques et que le carbone libéré au moment de la combustion de ce gaz est un carbone biogénique : il était déjà dans l'atmosphère, a été absorbé par la croissance des végétaux et se trouve libéré à nouveau dans l'atmosphère. A la différence de la combustion d'un propane fossile qui contribue à ajouter du carbone (prélevé sous terre) dans l'atmosphère.

Conclusion

Les analyses qui précèdent ont confirmé que les concepts mis en œuvre dans cette maison un peu particulière étaient les bons et qu'ils conduisaient aux résultats escomptés, les dépassant même souvent. La qualité du confort est excellente en hiver (20,2°C en moyenne) comme en été (<28°C), confirmant en cela les choix d'inertie qui ont été faits (en ne comptant au maximum que les 8 premiers cm de matériaux : 185 kg/m² (sol) et 85 (plafond) de masse au rez-de-chaussée, 85 et 85 kg /m² à l'étage). La qualité de l'air répond aux critères les plus sévères (niveau « excellent » 93% du temps au RdC et 80 % du temps à l'étage), la température de l'air soufflé par la VMC est en moyenne inférieure de 2°C à la température intérieure, en été cette ventilation souffle dans le logement de l'air dont la température peut être jusqu'à près de 10°C inférieure à la température extérieure.

Quant aux consommations d'électricité elles sont exceptionnellement faibles : seulement 1 863 kWh tous usages confondus. La consommation de chauffage est quasiment nulle (4,7 kWh), celle de l'eau chaude sanitaire n'est que de 695 kWh ce qui est très faible pour de l'effet Joule pour 4 personnes, malgré les pertes considérables des ballons d'eau chaude (45%), l'efficacité de la récupération de chaleur sur l'air extrait dépasse 85%, et les panneaux photovoltaïques ont produit 6,7 fois plus d'électricité que la maison n'en a consommé, tous usages confondus.

Aujourd'hui on peut donc affirmer, mesures à l'appui, qu'il est possible de construire des maisons ayant le même coût de construction que celles du secteur HLM, en matériaux biosourcés (beaucoup de paille), fonctionnant sans chauffage, produisant plus de 6 fois plus d'électricité qu'elles n'en consomment, et respectant les limites planétaires conduisant à ne pas dépasser 1,5°C pour la température terrestre en 2050 (analyse de l'Ecole des Mines de Paris).

Enfin, tout cela est du passé, car depuis la construction de cette maison le gouvernement français a décidé de ne plus rémunérer qu'à hauteur de 4 cts d'euro le kWh produit et vendu sur le réseau, moins cher que tous les autres types de production d'électricité. Temps de retour : supérieur à la durée de vie du matériel. Autant dire la mise à mort de la partie photovoltaïque de ce projet.

Mais l'analyse qui précède permet aussi de tirer des leçons et se demander ce que l'on ferait différemment si on refaisait ce type de projet. On peut distinguer trois axes d'action différents :

➤ La construction de l'enveloppe

Les choix faits n'apparaissent pas dans les mesures à la base de l'analyse qui précède mais dans les travaux préparatoires à la construction. Les matériaux nécessaires n'étaient pas, et à notre connaissance ne sont toujours pas, disponibles pour la réalisation :

- de l'isolation sous la dalle flottante en béton du rez-de-chaussée. La dalle est flottante car elle n'est pas portée par les murs périphériques ce qui supprime tous les ponts thermiques d'about de dalle (existence d'un isolant entre l'extrémité de la dalle et le mur). Par voie de conséquence elle est portée...par l'isolant qui doit donc avoir des caractéristiques de compressibilité extrêmement sévères (déformation tolérée sous contrainte de 80 kPa entre 0,8 à 1,1%). Un seul polystyrène était alors disponible (sachant que le polyuréthane n'était pas le bienvenu et le verre cellulaire (Misapor) à la fois trop cher et surtout peu performant ($\lambda=0,093$ W/mK) sur le plan thermique). Il faudrait qu'un matériau biosourcé puisse un jour le remplacer.
- Remplacer le béton armé de la dalle. Certes des bétons à plus faible contenu carbone apparaissent mais ils ne sont pas disponibles pour de petits chantiers pour l'instant. Mais les aciers jouent un rôle très important dans le poids carbone d'une

dalle. Une amélioration importante doit émerger, à un coût proche de ce qui se fait aujourd'hui. Se rappeler que le matériau retenu devra apporter la même inertie thermique que la solution béton actuelle.

- Les fondations en béton ont été choisies parce que les pieux en acier à visser, beaucoup plus économes en énergie grise et en EGES, nécessitaient une protection par courant électrique imposé si on voulait qu'ils durent 100 ans, courant qui finissait par consommer beaucoup plus d'énergie que l'énergie grise du béton ferrailé. Trouver mieux est nécessaire....

➤ Les équipements techniques

- La production ECS est faite par deux ballons électriques placés à proximité des points de puisage. La charge du ballon principal n'est autorisée qu'aux heures d'insolation, ce qui n'est pas possible pour le ballon de l'évier, trop petit pour accepter une seule charge quotidienne. Par ailleurs, les pertes des ballons restent considérables et il aurait été beaucoup plus efficace de n'avoir qu'un seul ballon, de 100 litres, pas beaucoup plus déperditif que celui de 80 litres, et finalement également très proche de l'évier. Cela aurait réduit les pertes, évité d'avoir parfois certaines pointes (charges simultanée des deux ballons), et aurait permis un asservissement quotidien unique aux heures d'insolation de toute la charge ECS autorisant une couverture solaire globale d'environ 95%.

- Mettre en place très vite du biopropane pour la cuisine. C'est aujourd'hui une denrée rare en France, à l'inverse des Pays Bas, de l'Allemagne ou du Royaume Uni. Mais le changement sera fait dans la maison dès que des bouteilles 13 kg existeront avec 100% de biopropane.

➤ Le fonctionnement quotidien

- Ce n'était pas directement le but recherché puisque les locataires ne bénéficient qu'indirectement de la production solaire d'électricité, mais les appels de puissance ne sont aujourd'hui contrôlés que pour le ballon ECS des salles d'eau. Or l'analyse montre que les pointes de puissance dépassant 2 kW pourraient presque toutes être évitées en mettant en route les appareils de manière séparée, ce qui est pratiquement toujours possible. Si cette maison était occupée par le propriétaire (exploitant des panneaux photovoltaïques) il serait judicieux de prévoir un délesteur permettant de programmer des ordres de priorité pour les différents appareils de puissance. La part d'électricité consommée fournie au même instant par la production solaire serait alors sensiblement plus importante.

- La campagne de mesure a montré que la bonne fréquence de nettoyage des filtres était encore beaucoup plus élevée que ce qui est évoqué un peu partout (tous les six mois, voire tous les ans). L'encrassement des filtres c'est une surconsommation d'électricité et une diminution du débit d'air. **La recommandation est de nettoyer les filtres tous les deux mois.** Ce qui confirme les choix faits lors de la conception de placer le « caisson de ventilation » à l'intérieur du volume chauffé (et pas dans les combles), à un endroit très facile d'accès pour une maintenance aisée.