
Application de la logique floue à un système Smart Grid.

Etudiants :

POIDATZ Guillaume

LIXFE Laurène

Enseignants :

ZALILA Zyed

DESCHAMPS Dimitri

Table des matières

I. Introduction	4
II. Etat de l'art.....	5
A. Evolution et émergence des Smart Grids	5
B. Principe de fonctionnement des réseaux électriques traditionnels.....	6
C. Principe de fonctionnement des Smart Grids.....	6
D. Études menées sur les Smart Grids à l'aide de la logique floue.....	8
E. Conclusion de l'état de l'art	9
III. Description du système	11
A. Schéma d'inférence hiérarchique	11
B. Systèmes flous	12
1) SF1 : Confort utilisateurs.....	12
2) SF2 : Besoin immeuble	14
3) SF3 : Consommation énergétique de l'immeuble	16
4) SF4 : Conditions météorologiques	18
5) SF5 : Besoin en électricité immeuble	20
6) SF6 : Electricité maximale théorique produite par panneau	21
7) SF7 : Production d'électricité solaire	24
8) SF8 : électricité disponible	26
9) SF9 : Tension immeuble	29
10) Agrégation des tensions immeubles	29
11) SF10 : Production d'électricité solaire.....	29
IV. Algorithme utilisé	33
V. Description du programme et axes d'amélioration	34
A. Description du programme	34
B. Axes d'amélioration	36
VI. Cas d'étude.....	37
A. Cas n°1 : Cas électricité en surplus important	37
Présentation.....	37
Résultats.....	37
B. Cas n°2 : Analyse de l'influence de 20% de maisons énergivores dans un parc immobilier de maisons non énergivores sur les mesures prises	38
Présentation.....	38
Résultats.....	38
C. Cas n°3 :.....	40
Présentation.....	40
Résultats.....	41

D. Cas n°4.....	41
Présentation.....	41
Résultats.....	42
E. Cas n°5.....	42
Présentation.....	42
Résultats.....	43
VII. Conclusion	44
VIII. Bibliographie	46
IX. Annexes.....	49
Cas d'étude 1 : données d'entrée.....	49
Cas d'étude 2 : données d'entrée.....	50
Cas d'étude 3 : données d'entrée.....	51
Cas d'étude 4 : données d'entrée.....	52
Cas d'étude 5 : données d'entrée.....	53

Table des figures

Figure 1 : Fonctionnement des Smart Grids	7
Figure 2 : Caractéristiques d'un réseau intelligent (à droite) par rapport au système électrique traditionnel (à gauche)	8
Figure 3 : Architecture du système d'inférence flou	11
Figure 4 : inclinaison et orientation des rayons du soleil en fonction de la saison et du moment de la journée (cf bibliographie).....	22
Figure 5 : Caractéristique de différentes technologies de stockage d'énergie ayant servi à la caractérisation de la variable "stockage" (cf bibliographie)	28
Figure 6 : Algorithme de Zalila généralisé - Cours 5-22	33
Figure 5.7 : ensemble des fichiers du programme smart grid	Erreur ! Signet non défini.
Figure 8 : Mesures cas d'étude 1	38
Figure 9 : cas d'étude 2 - comparaison de la tension immeuble d'un immeuble non énergivore (gauche) et d'un immeuble énergivore (droite)	39
Figure 10 : Mesures cas d'étude 2 - 4 maisons non énergivores et une maison non énergivore	39
Figure 11 : Mesures cas d'étude 2 - 5 maisons non énergivores.....	40
Figure 12 : Mesures cas d'étude 3	41
Figure 13 : Mesures cas d'étude 4	42
Figure 14 : Mesures cas d'étude 5	43

Tableaux de décision

Table de décision 1 : Confort utilisateur	13
Table de décision 2 : Besoin immeuble.....	16
Table de décision 3 : Consommation énergétique de l'immeuble	18
Table de décision 4 : Conditions météorologiques.....	20
Table de décision 5 : Besoin en électricité immeuble.....	21
Table de décision 6 : Electricité maximale théorique produite par panneau.....	24
Table de décision 7 : production d'électricité solaire	26
Table de décision 8 : électricité disponible	28
Table de décision 9 : Tension immeuble	29
Table de décision 11 : Mesures	32

Table des partitions

Partition 1 : Confort chauffage.....	12
Partition 2 : Confort éclairage	13
Partition 3 : Superficie immeuble	14
Partition 4 : densité de personne.....	15
Partition 5 : Isolation thermique	17
Partition 6 : Humidité de l'air.....	19
Partition 7 : Température extérieure	19
Partition 8 : Moment de la journée	20
Partition 9 : Optimisation panneau solaire	21
Partition 10 : Moment de la journée	22
Partition 11 : Saison	23
Partition 12 : Ensoleillement	25
Partition 13 : Nombre de panneaux.....	25
Partition 14 : Stockage	27
Partition 15 : Tension immeuble agrégée.....	30
Partition 16 : capacité V2G.....	31
Partition 17 : prix de l'électricité.....	31

I. Introduction

Un réseau électrique intelligent appelé « Smart Grid » en anglais, est un réseau de distribution d'électricité qui facilite la circulation de l'information entre les fournisseurs et les consommateurs pour ajuster le flux électrique en temps réel et rendre la gestion plus efficace. [1]

Il est nécessaire de différencier « smart grid » de compteur communicant (ou « smart meter »), qui renseigne le consommateur sur sa demande en électricité. L'appellation générale de « Smart grids » est employé pour l'ensemble des technologies et des infrastructures « intelligentes » installées. Chez le particulier, le compteur communicant est une première étape dans la mise en place des smart grids.[2]

Aujourd'hui ces réseaux de distribution d'électricité intelligents sont intégrés dans les sites de production, les infrastructures réseaux et chez les consommateurs pour optimiser tous les maillons du réseau électrique. Par conséquent, les Smart Grids permettent de développer et de consommer des ressources locales provenant du vent, du soleil ou des courants océaniques.

La France est le leader européen de ces systèmes de modernisation des réseaux électriques.

Les smart grids sont ainsi l'un des piliers dans la quête de la neutralité carbone de l'Europe. En France, de nombreux projets, s'inscrivent dans cette dynamique. Objectif : augmenter la part d'énergies renouvelables dans le mix électrique. En Bretagne et en Pays de la Loire, le projet Smile (pour Smart Ideas to Link Energies) consiste à mettre en place un réseau électrique à la pointe de l'innovation.

Sur la répartition par pays, une dizaine d'Etats se démarquent par leur dynamisme au-dessus de la moyenne, mais deux pays dominant largement les expérimentations smart grids en Europe : l'Allemagne et la France.

Porté par un distributeur d'énergie (Enedis) très impliqué dans cette technologie et une volonté politique forte (renforcée par la Loi sur la Transition Ecologique et la Croissance Verte de 2015), la France fait même figure de pays le plus avancé : en plus d'être co-leader européen en nombre de projets, la France est le seul pays d'Europe à disposer de davantage de démonstrateurs que de projets de recherche et développement. [3]

À travers ce projet SY10 , nous avons pour objectif d'utiliser **la logique Floue** pour optimiser la production, la distribution, la consommation et le stockage de l'énergie afin de mieux coordonner l'ensemble des mailles du réseau électrique, du producteur au consommateur final.

II. Etat de l'art

A. Evolution et émergence des Smart Grids

La lecture automatique des compteurs permettant de surveiller les charges électriques chez les consommateurs est apparue dans les années 1980. C'est une première étape dans l'émergence des smart grids. Elle évolue dans les années 1990 vers le principe du compteur communicant, qui communique des informations sur la variation de consommation électrique au cours de la journée.

Le suivi et la synchronisation des réseaux ont été améliorés dans les années 1990 par la mise en place de capteurs analysant rapidement et à longue distance les anomalies électriques. Le premier système de mesure utilisant ce type de capteurs est opérationnel en 2000 aux États-Unis. A partir des années 2000, le projet italien Telegestore est le premier exemple de smart grid, qui par l'intermédiaire de ces compteurs, relie au réseau un grand nombre de foyers (27 millions). [4]

Aujourd'hui, les réseaux intelligents se développent progressivement. L'expression smart grids se généralise en 2005 avec la mise en place par la Commission Européenne de la plateforme technologique « *Smart grids* ». En France plusieurs projets ont été développés ces dernières années. En effet une ville intégrant un smart grid devient alors une « Smart city ».

Le projet de quartier solaire Nice Grid, en 2011, a été lancé à Carros (Alpes-Maritimes). Ce projet est l'un des principaux démonstrateurs français à avoir préparé le réseau électrique de demain. Pendant 5 ans, Nice Grid a cherché à optimiser le système énergétique en intégrant une part importante d'électricité photovoltaïque produite et stockée localement. Parmi les résultats significatifs de l'expérience, on note une réduction de 20 % de la consommation hivernale pendant les pics de consommation.

À Nanterre, un double Smart Grid, à la fois thermique et électrique, permet de piloter la production de chauffage, la climatisation et l'eau chaude sanitaire d'un éco-quartier en intégrant 60 % d'énergies renouvelables et de récupération. Pas moins de cinq sources d'énergies locales sont mobilisées : géothermie, photovoltaïque, récupération de la chaleur des eaux usées, récupération de la chaleur extérieure et centrale de cogénération fonctionnant à la biomasse. La performance énergétique née de ce Smart Grid a permis de réduire de 20 % la facture des habitants du quartier.

B. Principe de fonctionnement des réseaux électriques traditionnels

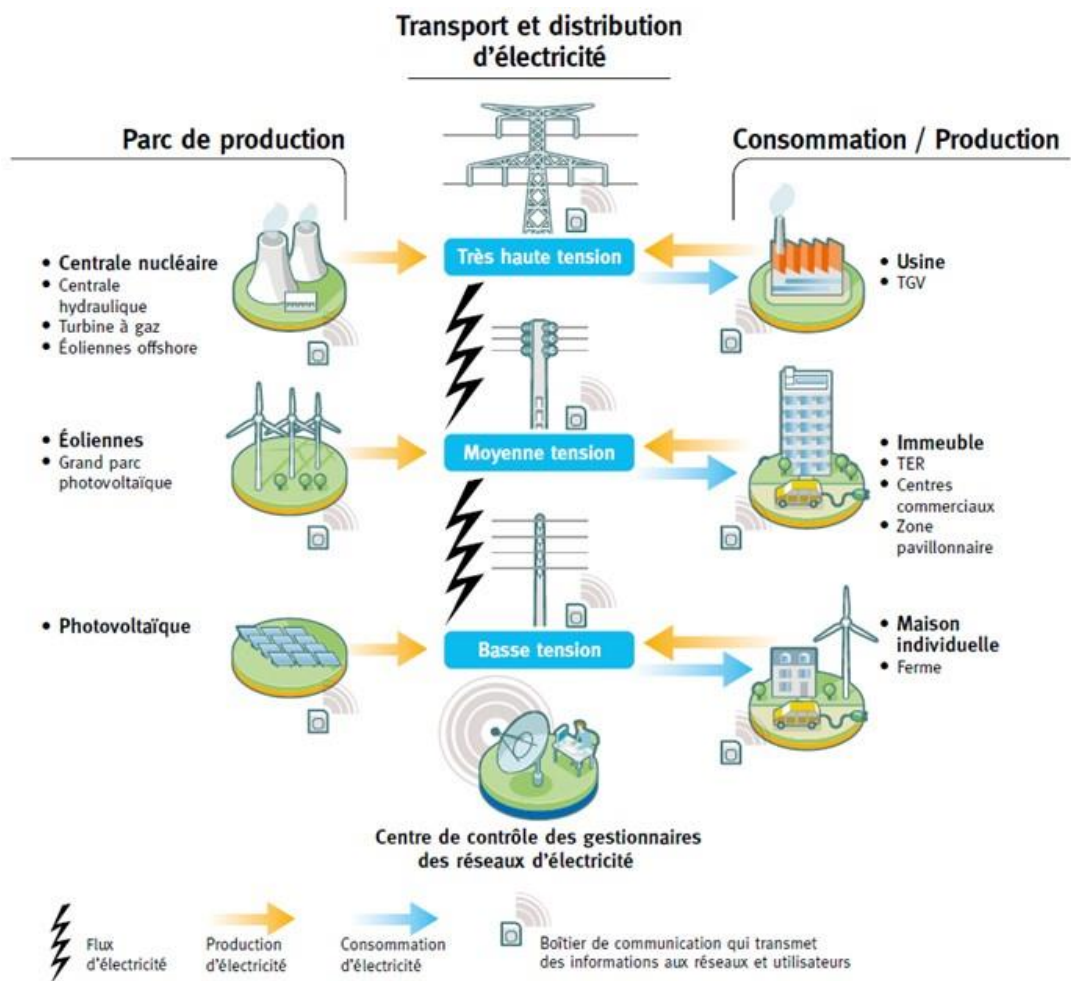
Les réseaux électriques traditionnels fonctionnent sur un modèle dit : « centralisé ». Ils sont conçus autour des pôles de production afin d'acheminer les flux énergétiques vers le consommateur final de la façon suivante :

- Le réseau Haute Tension, géré en France par RTE (Réseau de Transport d'Electricité), est souvent comparé aux autoroutes. Sa fonction est d'acheminer l'électricité vers les réseaux de distribution publics Moyenne Tension.
- Le réseau de distribution Moyenne Tension achemine l'électricité d'un poste source vers les postes de transformation Moyenne et Basse Tension, puis vers le compteur électrique du consommateur final. Les grandes industries peuvent directement être reliées au réseau Moyenne Tension, géré par Enedis (ex ERDF) en France.

C. Principe de fonctionnement des Smart Grids

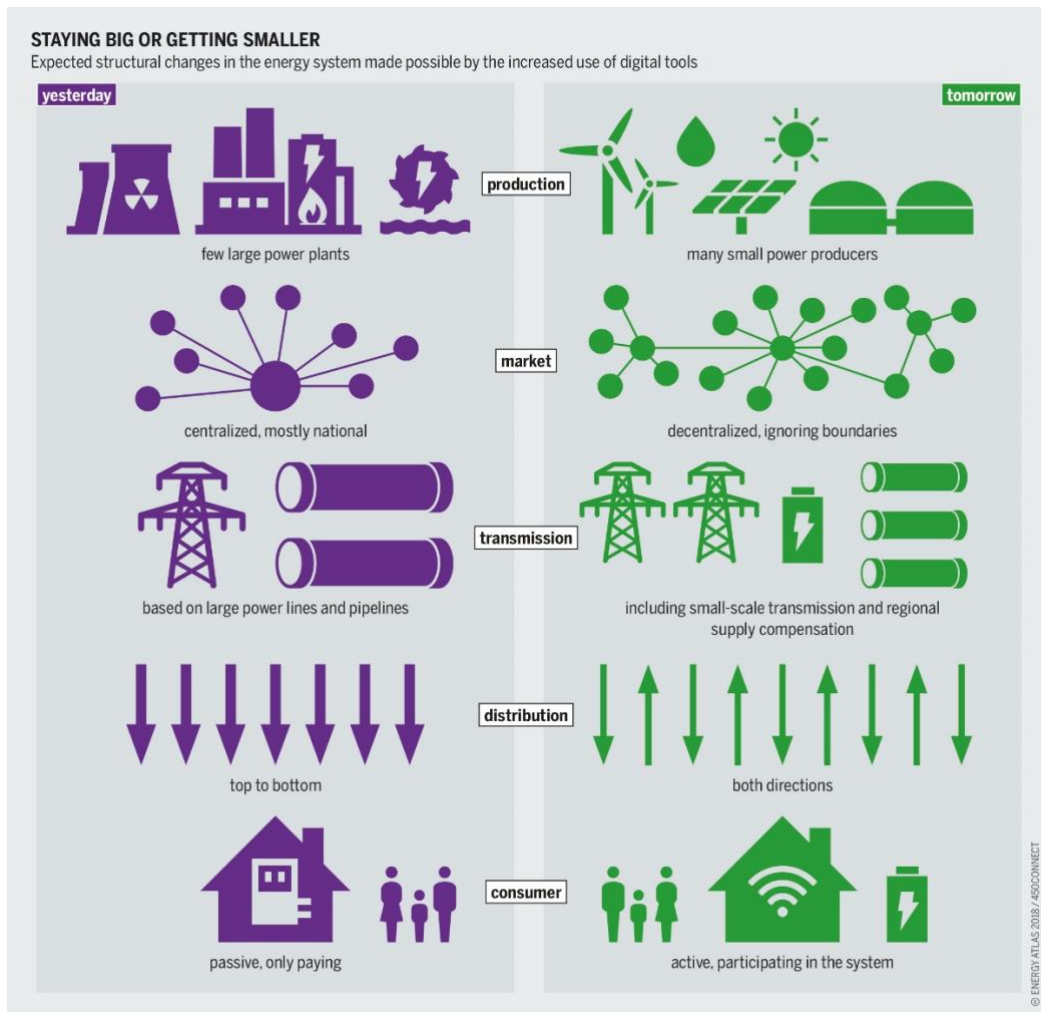
Le fonctionnement d'un smart grid repose sur un ensemble de technologies qui collectent, analysent et transmettent des informations en temps réel sur l'énergie qui circule. Ces technologies permettent ensuite aux réseaux électriques de communiquer entre eux pour assurer l'équilibre entre l'offre et la demande, et éviter une surcharge du réseau. L'approvisionnement en électricité devient plus sûr.

Avec le développement des énergies renouvelables, ce modèle unidirectionnel est voué à évoluer vers un modèle multidirectionnel grâce au développement des Smart Grids. La production d'énergie renouvelable n'étant plus centralisée, elle peut être réinjectée et redistribuée à tout endroit du réseau, même depuis la batterie d'une voiture électrique branchée sur sa borne de recharge (Vehicule to Grid ou V2G).



Source : Smart grids : les projets fleurissent en Europe, la France bien placée (les-smartgrids.fr)

Figure 1 : Fonctionnement des Smart Grids



Source : https://fr.wikipedia.org/wiki/reseau_electrique_intelligent

Figure 2 : Caractéristiques d'un réseau intelligent (à droite) par rapport au système électrique traditionnel (à gauche).

D. Études menées sur les Smart Grids à l'aide de la logique floue

L'application de la logique floue dans le domaine des Smart Grid a déjà été étudiée sous diverses approches. D'une part dans le cadre de la cyber sécurité du réseau électrique et d'autre part dans un but d'optimisation de la consommation énergétique.

On peut citer comme exemple de travaux les thèses suivantes :

- A Fuzzy Logic Trust Model for Secure Routing in Smart Grid Networks [6]

Les smart grids nécessitent des réseaux de communication pour transmettre des données de détection et de contrôle, ce qui implique également que ces réseaux sont vulnérables à différents types de cyberattaques. Cette étude publiée en 2017, propose un modèle dit de « confiance » réalisé à l'aide de la logique floue, dans le but de détecter les cyberattaques que peut subir le réseau électrique intelligent, puis de les contrer.

- La logique floue au coeur d'un algorithme d'optimisation de la consommation d'énergie électrique d'une habitation individuelle [7]

Cette étude présente un algorithme de prédiction de la consommation d'énergie électrique dans l'habitat individuel. Cet algorithme qui s'appuie sur la logique floue, a été développé à l'aide du logiciel MATLAB. Des mesures de consommation d'énergie électrique ont été effectuées dans 5 maisons. Des courbes de charges ont été étudiées. L'algorithme de prédiction de la consommation a ainsi pu être mis en œuvre. L'objectif principal de cette prédiction est d'aider à gérer la consommation d'électricité. Sans prédiction, les pointes de consommation peuvent être effacées de façon chronologique. Avec la prédiction, les pics de consommation peuvent être prévus et donc mieux gérés. Les habitations équipées d'un système de stockage peuvent en outre réinjecter l'électricité stockée durant les périodes de pointe. La technique mise en œuvre dans cet article apporte une réelle solution contre les éventuelles coupures d'électricité.

E. Conclusion de l'état de l'art

Dans ce bref état de l'art nous avons évoqués plusieurs points à savoir :

- L'émergence et l'évolution des smart grids qui s'avère être un réel atout pour la transition écologique. Leur développement qui a commencé en Europe continue de s'étendre au-delà des frontières Européennes.
- Le principe de fonctionnement d'un réseau traditionnel et celui d'un Smart Grid. Ce dernier contrairement au réseau traditionnel intègre le consommateur au sein du réseau de distribution. Les consommateurs deviennent alors eux aussi des acteurs du système et participe au système.
- Et enfin nous avons évoqué deux systèmes utilisant la logique floue avec les réseaux intelligents dans deux domaines. Ces systèmes contribuent à l'amélioration des Smart Grids.

Pour notre projet nous nous sommes inspirés de la deuxième étude citée précédemment. L'objectif de notre projet est donc : l'optimisation d'un réseau électrique intelligent, au sein d'un quartier comportant 5 bâtiments différents ou tous identiques, contrôlés à l'aide d'un système flou. Nous voyons ce projet comme un projet contrôlant de manière optimale la production, la distribution et le stockage N bâtiments (nous nous limiterons à 5 bâtiments) d'un quartier.

III. Description du système

A. Schéma d'inférence hiérarchique

Notre système de Smart Grid se compose de 9 systèmes flous intermédiaires, d'un agrégateur de données et d'un système flou final. Nous disposons également, de 16 variables linguistiques floues en entrées. Nous avons créé chaque système flou à l'aide de la Fuzzy Toolbox du logiciel de programmation Matlab.

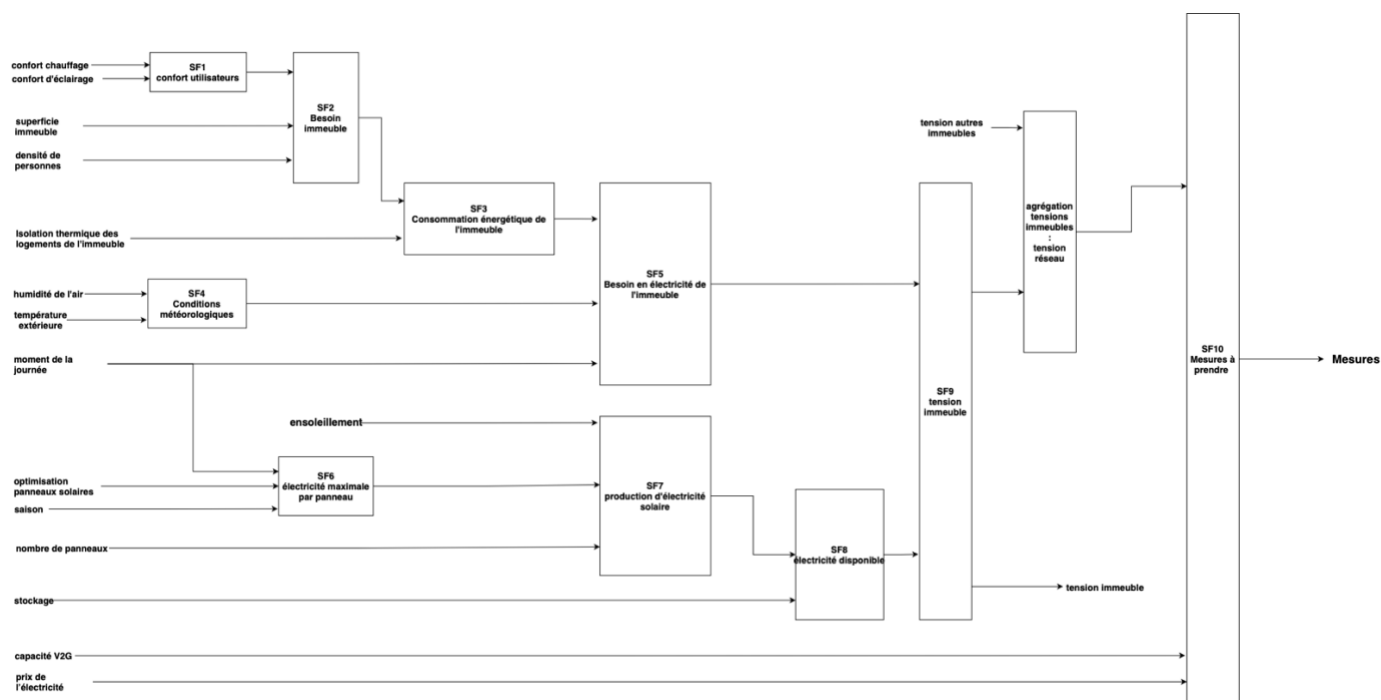


Figure 3 : Architecture du système d'inférence flou

B. Systèmes flous

Afin de déterminer les différentes classes et leurs valeurs nous avons utilisé différentes sources bibliographiques (cf Bibliographie).

1) SF1 : Confort utilisateurs

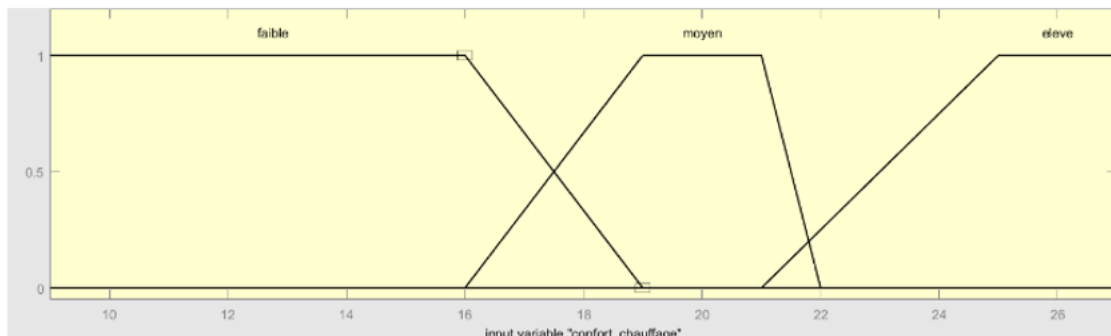
Pour ce système flou, nous avons **deux** variables floues en entrée à savoir : le confort chauffage et le confort d'éclairage. Toutes deux correspondent à la sensation de confort c'est-à-dire à la sensation de « bien-être », en termes de température intérieure de chauffage et de luminosité intérieure, ressenti par le ou les utilisateurs du logement.

Variable d'entrée SF1 : Confort chauffage

L'univers du discours choisi pour cette variable est $X = [9\ 27]^\circ\text{C}$. Cette variable est définie par un Intervalle Flou Trapézoïdal (IFT) normal sur X . Trois classes floues sont utilisées :

- Faible : $[9\ 9\ 16\ 19]$
- Moyen : $[16\ 19\ 21\ 22]$
- Élevé : $[21\ 23\ 27\ 27]$

Cette variable caractérise le profil type d'une personne vivant dans un immeuble en termes de température qu'il considère nécessaire à son confort. Ainsi ses attentes peuvent être "faibles, moyennes ou élevées".



Partition 1 : Confort chauffage

Variable d'entrée SF1 : Confort éclairage

L'univers du discours choisi pour cette variable est $X = [20\ 5000]\text{ lx}$ (lux). Cet univers a été choisi car :

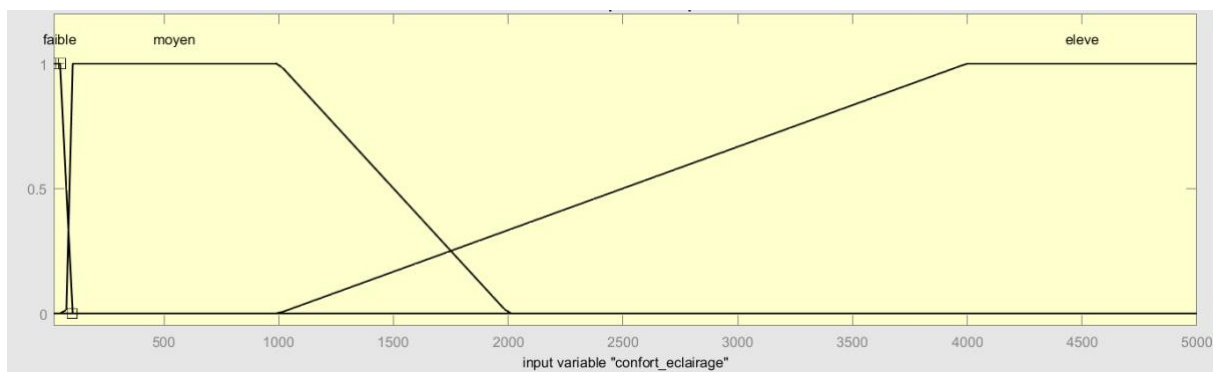
« Dans des conditions normales d'éclairage, un éclairage de 20 lx est nécessaire pour discerner, à la limite de perception, les caractéristiques principales d'un visage humain et a été adopté comme valeur la plus faible dans l'échelle des éclairages. L'échelle des éclairages recommandée (en lx) est : 20 — 30 — 50 — 75 — 100 — 150 — 200 — 300 — 500 — 750 — 1 000 — 1 500 — 2 000 — 3 000 — 5 000. »

« En général, pour un bon éclairage dans le salon, vous devez vous attendre à environ 500 à 700 lumens par mètre carré. »

Cette variable est définie par un Intervalle Flou Trapézoïdal (IFT) normal sur X. Trois classes floues sont utilisées à savoir :

- Faible : [20 20 50 100]
- Moyen : [75 100 1000 2000]
- Élevé : [1000 4000 5000 5000]

Cette variable définit le profil type d'une personne vivant dans un immeuble en termes de luminosité qu'il considère nécessaire à son confort.



Partition 2 : Confort éclairage

Ce système d'inférence flou donne en sortie une variable linguistique floue : **Confort utilisateur** ; qui donne le besoin en termes de confort pour un utilisateur type d'un immeuble. Elle est définie par trois classes floues à savoir : « faible, moyen, élevé ».

La construction des règles suit la logique suivante : prépondérance du confort chauffage sur le confort éclairage car le confort chauffage est beaucoup plus consommateur d'électricité que le confort luminosité.

Règles SF1 : Confort utilisateur

Confort chauffage	Faible	Moyen	Élevé
Confort éclairage			
Faible	Faible	Moyen	Moyen
Moyen	Faible	Moyen	Élevé
Élevé	Moyen	Moyen	Élevé

Table de décision 1 : Confort utilisateur

2) SF2 : Besoin immeuble

Pour ce système, nous avons **trois** variables floues en entrée à savoir :

Variable d'entrée SF2 : Confort utilisateur

Variable de sortie du SF1 et définie par trois classes floues de sortie à savoir :

- Faible
- Moyen
- Elevé

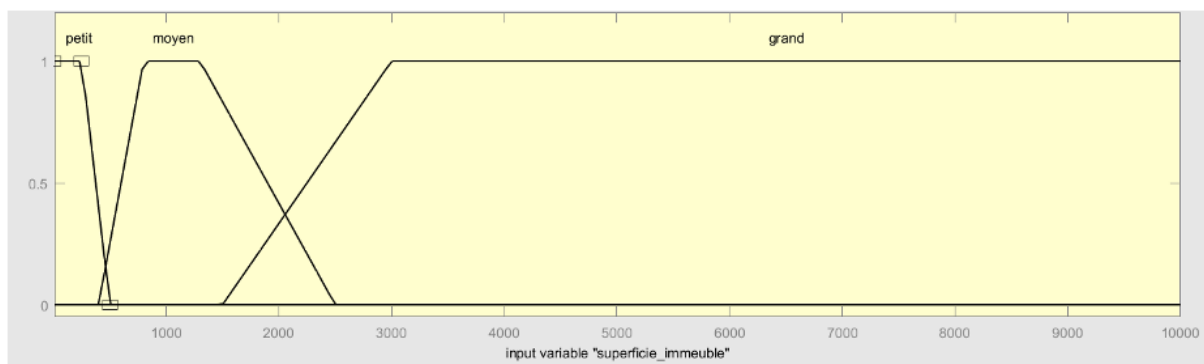
Cette variable définit le confort utilisateur d'un utilisateur type ; d'un agent (immeuble) de notre système. C'est donc une caractéristique d'un agent du système. Plus le confort utilisateur sera élevé, plus cela résulte en une consommation d'énergie importante.

Variable d'entrée SF2 : Superficie immeuble

Cette variable est définie par trois classes floues à savoir :

- Petit : [0 0 250 500]
- Moyenne : [400 800 1300 2500]
- Grand : [1500 3000 10000 10000]

Cette variable est définie par un Intervalle Flou Trapézoïdal (IFT) normal sur $X = [9 ; 10\ 000]$ m².



Partition 3 : Superficie immeuble

Pour définir les classes floues de cet ensemble, nous avons fait d'abord un partitionnement symbolique de type "maison, supermarché, et immeuble résidentiel" puis nous avons ramené cela à "petit, moyen, grand" car tous les immeubles (agent) ne seront pas forcément de ce type. "maison" et "immeuble résidentiel" ont été construits à partir de notre propre expertise et de recherche sur internet. Quant aux "supermarchés", ils sont définis officiellement entre 400 et 2500 m². Le noyau est défini par notre expertise personnelle et la réponse à cette question "Quelle est la possibilité qu'avec cette surface l'agent soit un supermarché ?". L'univers du discours est donc défini sur $[9 ; 10\ 000]$ m². Cet univers a été choisi car :

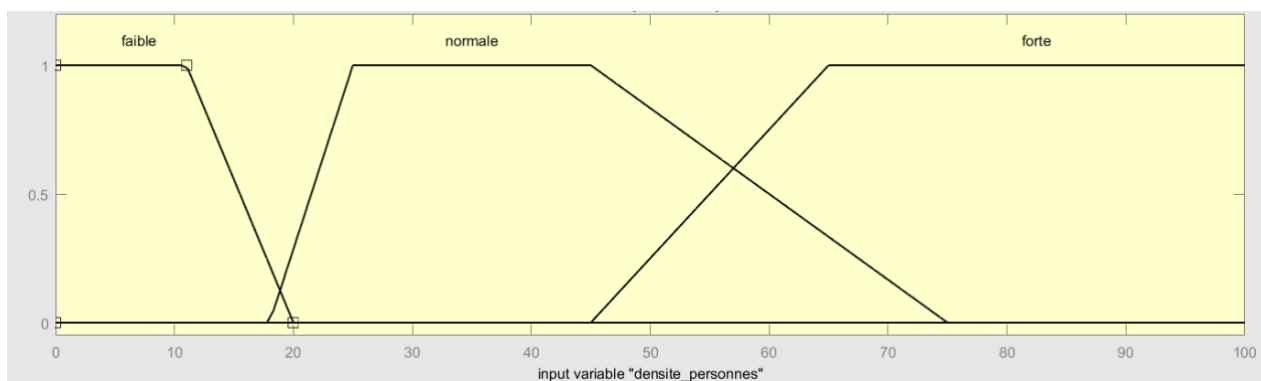
- 9 m² est officiellement la surface minimum pour un bail individuel en deçà de laquelle il est impossible pour le propriétaire de mettre en location l'appartement,
- La borne supérieure est une volonté délibérée de limiter l'univers du discours à des quartiers à taille humaine et de ne pas prendre en compte les zones telles que : quartiers d'affaire gratte-ciel, zones industrielles. On pense que ces cas sont très particuliers et que le système risque de ne plus très bien fonctionner par la suite. On préfère limiter l'univers du discours et avoir un système fonctionnel et rajouter les difficultés supplémentaires dans un second. Ce serait par ailleurs une voie d'amélioration possible de notre système.

Variable d'entrée SF2 : Densité de personnes

Cette variable est définie par trois classes floues à savoir :

- Faible : [0 0 11 20]
- Normale : [18 25 45 75]
- Forte : [45 65 100 100]

Elle définit le nombre de personnes par m² relativement à la plus forte concentration possible c'est à dire 1 personne pour 9 m². Elle est donnée en pourcentage par un Intervalle Flou Trapézoïdal (IFT) normal sur X= [0 100] %.



Partition 4 : densité de personne

Ce système d'inférence flou donne en variable floue de sortie : le **Besoin immeuble** qui donne le besoin pour un agent. Cette variable floue est définie par trois classes floues : « Faible, normale, forte ».

Confort utilisateur = Faible

Superficie immeuble	Petit	Moyen	Grand
Densité de personnes			
Faible	Faible	Faible	Moyen
Normale	Moyen	Moyen	Moyen
Forte	Faible	Moyen	Elevé

Confort utilisateur = Moyen

Superficie immeuble	Petit	Moyen	Grand
Densité de personnes			
Faible	Faible	Faible	Moyen
Normale	Moyen	Moyen	Élevé
Forte	Faible	Élevé	Élevé

Confort utilisateur = Elevé

Superficie immeuble	Petit	Moyen	Grand
Densité de personnes			
Faible	Moyen	Moyen	Élevé
Normale	Élevé	Élevé	Élevé
Forte	Moyen	Élevé	Élevé

Table de décision 2 : Besoin immeuble

Les règles sont construites de la façon suivante :

- Prépondérance de la densité sur la surface car le “confort immeuble” est plus faible que le “confort utilisateur” (confort éclairage nul et confort chauffage plus faible) (vert).
- Arrivé à une certaine densité très importante, celle-ci va avoir l’effet inverse de celui escompté et provoquer une baisse du besoin immeuble (chaleur humaine) (rouge).
- L’influence du confort utilisateur est directement reliée au nombre de personnes dans l’immeuble (agent) qui est croissant selon la diagonale partant d’en bas à gauche. Ainsi son influence est bien plus importante en bas à droite qu’en haut à gauche (jaune vs orange).

3) SF3 : Consommation énergétique de l’immeuble

Pour ce système, nous avons **deux** variables floues en entrées à savoir : le Besoin utilisateur issu du SF2 et l’isolation thermique du logement.

Variable d’entrée SF3 : Besoin immeuble

La sortie du système précédent SF2 qui représente le besoin pour un agent, définit par trois classes floues : « Faible, Moyen Elevé ».

Variable d’entrée SF3 : Isolation thermique du logement

Le but de l'isolation thermique est de diminuer les échanges de chaleur entre l'intérieur et l'extérieur par interposition d'un matériau ayant la capacité de conduction la plus faible possible ou encore une résistance thermique la plus élevée possible.

Des murs non (ou mal) isolés sont à l'origine de 20 à 25 % des déperditions. Avant d'engager des travaux d'isolation dans une construction existante, il faut donc diagnostiquer la résistance thermique des parois. Nous aurions pu seulement nous concentrer sur l'isolation des murs de l'immeuble mais nous prendrons aussi en compte l'isolation de la toiture.

La condition d'une isolation performante est d'utiliser des isolants qui offrent **la résistance thermique la plus forte**. Plus la résistance thermique (R) du système d'isolation est élevée, moins il y aura besoin de consommer de l'énergie. Or l'énergie qui n'est pas consommée est une énergie qui ne coûte pas et ne pollue pas.

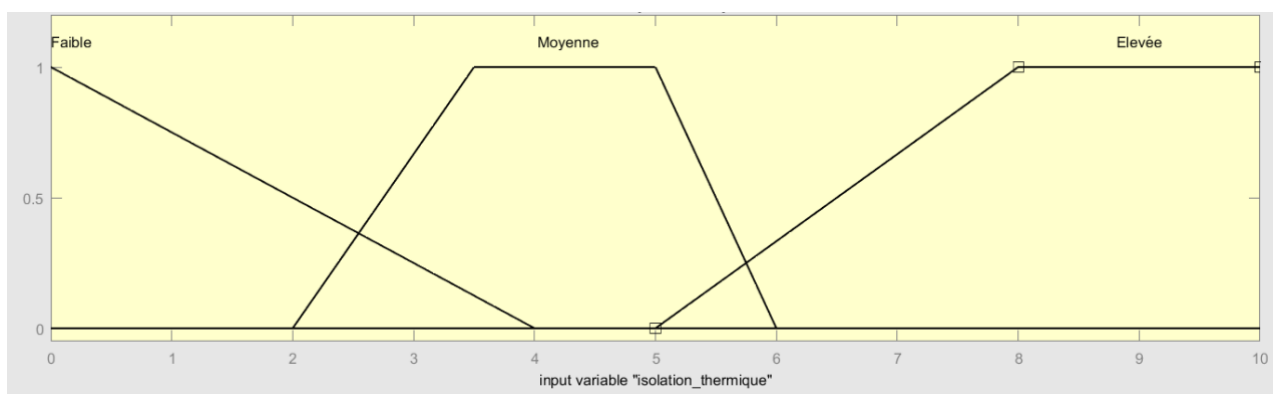
On suppose nos immeubles neufs durant toute notre étude. **Pour un bâtiment neuf**, afin de répondre aux exigences de la RT 2012 Bâtiment Basse Consommation (BBC), il faut opter pour une bonne performance thermique de l'enveloppe du bâtiment et choisir des valeurs minimales de performance [6] :

- $R = 8 \text{ m}^2 \cdot \text{K/W}$ pour la **Toiture**,
- $R = 4 \text{ m}^2 \cdot \text{K/W}$ pour les **Murs en façade ou en pignon et Planchers bas**.

Nous posons alors comme univers du discours $X = [0 \ 10] \text{ m}^2 \cdot \text{K/W}$.

Nous pouvons alors définir trois classes floues pour cette variable :

- Faible : [0 0 0 4] Nombre Flou Triangulaire
- Moyen : [2 3.5 5 6] IFT normal
- Élevé : [5 8 10 11] IFT normal



Partition 5 : Isolation thermique

Ce système flou donne en variable floue de sortie : la **consommation énergétique**. Cette variable floue est définie par quatre classes floues :

- Consommation Très Faible (CTF)

- Consommation Faible (CF)
- Consommation Moyenne (CM)
- Consommation Elevée (CE)

Règles SF3 : Consommation énergétique de l'immeuble

Besoin Utilisateur	Faible	Moyen	Elevé
Isolation thermique du logement			
Faible	CF	CM	CE
Moyenne	CF	CM	CE
Elevée	CTF	CTF	CM

Table de décision 3 : Consommation énergétique de l'immeuble

4) SF4 : Conditions météorologiques

Pour ce système, nous avons **deux** variables floues en entrée à savoir :

Variable d'entrée SF4 : Humidité de l'air :

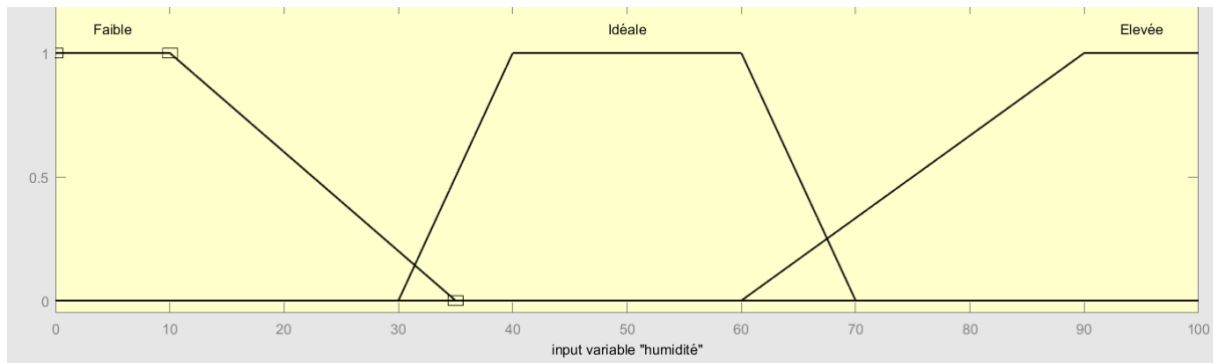
L'hygrométrie est la mesure du degré d'humidité dans l'atmosphère. Une hygrométrie de 50% correspond à un niveau de saturation en eau humide dans l'air de 50%, une hygrométrie de 0% correspond à un air parfaitement sec, une hygrométrie de 100% correspond à un air saturé en eau et toute quantité d'eau qu'on y ajouterait tombera sous forme de pluie ou de neige. [15]

Une humidité relative dépassant 60% produira une sensation de froid qui nous conduira à augmenter la température intérieure de l'habitat et donc influe sur la consommation énergétique de l'habitat. Idéalement, le **taux d'humidité dans l'air** doit être compris entre 40 et 60 % dans une habitation. Ce **taux** peut être mesuré à l'aide d'un hygromètre.

Cette variable est donc définie par un scalaire net en % sur $X = [0 \ 100]$.

On utilise donc trois classes floues à savoir :

- Faible = [0 0 10 35]
- Idéale = [30 40 60 70]
- Elevé = [60 90 100 100]



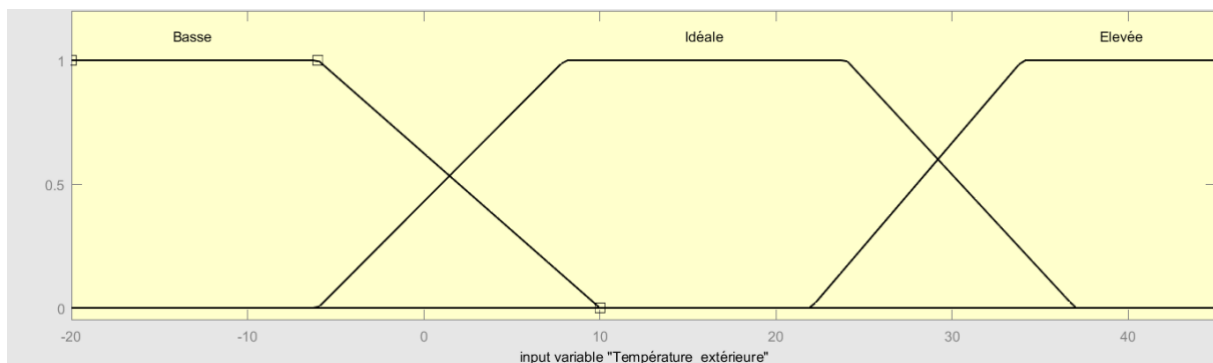
Partition 6 : Humidité de l'air

Variable d'entrée SF4 : Température extérieure

L'univers du discours choisi pour cette variable est $X = [-20 +45]$ °C. Cette variable est définie par un Intervalle Flou Trapézoïdal (IFT) normal sur X. Trois classes floues sont utilisées :

- Basse = $[-20 -20 -6 10]$
- Idéale = $[-6 8 24 37]$
- Elevée = $[22 34 45 45]$

La **température** est une grandeur physique mesurée à l'aide d'un thermomètre et étudiée en thermométrie. Dans la vie courante, elle est reliée aux sensations de froid et de chaud, provenant du transfert thermique entre le corps humain et son environnement.



Partition 7 : Température extérieure

Ce système flou donne en variable floue de sortie : les **conditions météorologiques**. Cette sortie du SF4 est définie par 3 classes floues :

- Bonnes
- Moyennes
- Mauvaises

Cette sortie peut s'interpréter comme une sensation de "beau temps" c-à-d : une journée ou période où le temps est agréable, les températures sont clémentes, le taux d'humidité dans l'air est idéal.

Règles SF4 : Conditions météorologiques

Température Extérieure	Basse	Idéale	Elevée
Humidité de l'air			
Faible	Mauvaises	Moyennes	Mauvaises
Idéale	Moyennes	Bonnes	Moyennes
Elevée	Mauvaises	Moyennes	Mauvaises

Table de décision 4 : Conditions météorologiques

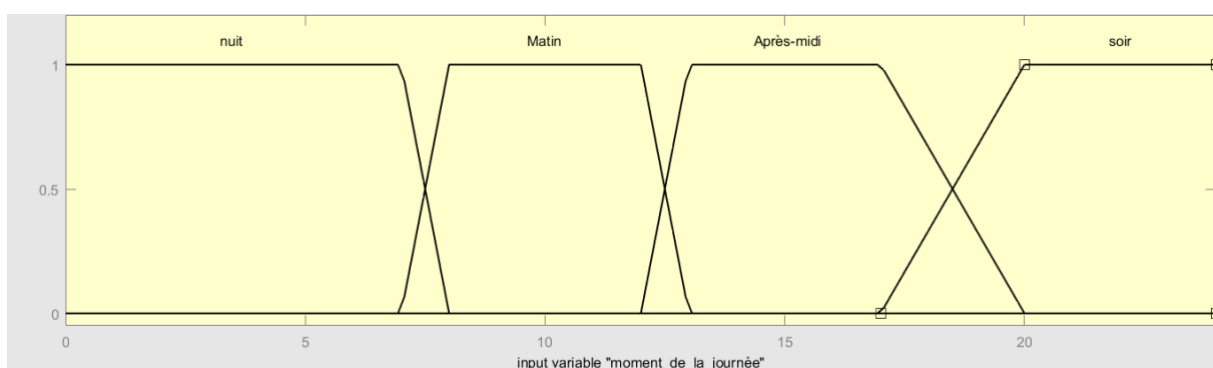
5) SF5 : Besoin en électricité immeuble

Dans ce système flou nous combinons les sorties des deux systèmes précédents définis dans 4.2.3 et 4.2.4 qui deviennent alors, des entrées du SF5 associées à une 3^{ème} entrée nommée « Moment de la journée ». La sortie de ce système est **le besoin en électricité immeuble** à défini par **trois** classes floues à savoir : « Faible, Moyen, Elevé »

Variable d'entrée SF5 : Moment de la journée

L'univers du discours choisi pour cette variable est $X = [0 \ 24]$ h. Cette variable est définie par un Intervalle Flou Trapézoïdal (IFT) normal sur X. Quatre classes floues sont utilisées :

- Nuit = [0 0 7 8]
- Matin = [7 8 12 13]
- Après-Midi = [12 13 17 20]
- Soir = [17 20 24 24]



Partition 8 : Moment de la journée

Règles SF5 : Besoin en électricité immeuble

Conditions météorologiques = Mauvaises

Moment de la journée	Nuit	Matin	Après-midi	Soir
Consommation énergétique				
CTF	Faible	Faible	Faible	Faible
CF	Moyen	Faible	Faible	Moyen
CM	Elevé	Moyen	Moyen	Elevé
CE	Elevé	Elevé	Elevé	Elevé

Conditions météorologiques = Moyennes

Moment de la journée	Nuit	Matin	Après-midi	Soir
Consommation énergétique				
CTF	Faible	Faible	Faible	Faible
CF	Faible	Faible	Faible	Faible
CM	Moyen	Faible	Faible	Moyen
CE	Elevé	Moyen	Moyen	Elevé

Conditions météorologiques = Bonnes

Moment de la journée	Nuit	Matin	Après-midi	Soir
Consommation énergétique				
CTF	Faible	Faible	Faible	Faible
CF	Faible	Faible	Faible	Faible
CM	Moyen	Faible	Faible	Moyen
CE	Moyen	Moyen	Moyen	Elevé

Table de décision 5 : Besoin en électricité immeuble

6) SF6 : Electricité maximale théorique produite par panneau

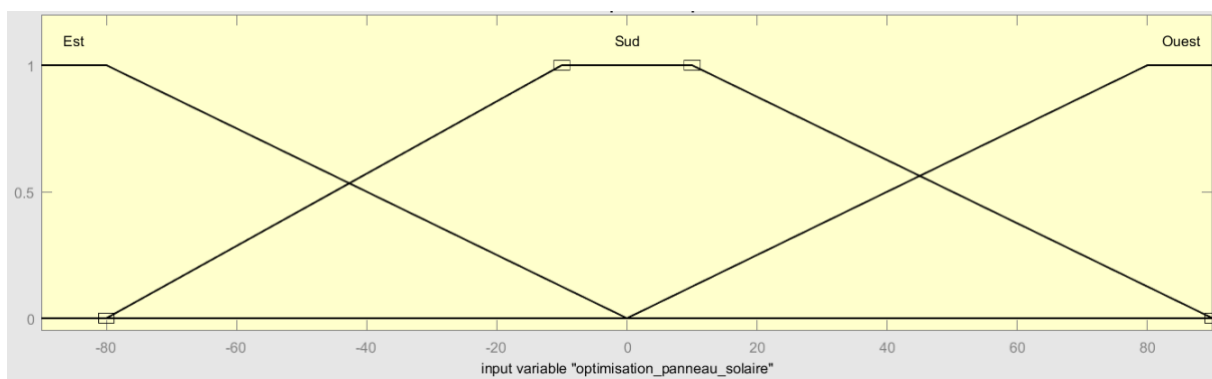
Dans ce système d'inférence flou nous nous intéressons à l'électricité maximale théorique produite par panneau qui dépend de **trois** variables à savoir :

Variable d'entrée SF6 : Optimisation panneau solaire

Cette variable est définie par trois classes floues à savoir :

- Est = [-90 -90 -80 0]
- Sud = [-90 -10 10 90]
- Ouest = [0 80 90 90]

Ces classes sont sous la forme d'IFT normaux. Cette variable définit pour quel moment de la journée le panneau solaire a été optimisé (orientation et inclinaison). L'univers du discours choisi est $X = [-90 \ 90]^\circ$.



Partition 9 : Optimisation panneau solaire

Variable d'entrée SF6 : Moment de la journée

En fonction du moment de la journée, et selon l'**optimisation de panneau solaire** choisie, on aura un écart par rapport à la configuration optimale pour ce moment de la journée (cf figure ci-dessous). Cette variable est définie par quatre classes floues à savoir : "Nuit, Matin, Après-midi, Soir" avec pour univers du discours : $[0, 24]$ h, comme décrit précédemment dans le SF5. Comme la nuit commence selon nous à 22h, le 0 du partitionnement flou correspond à 22h (ceux-ci afin de ne pas créer une 5^{ème} classe floue virtuelle, l'union d'IFT n'étant pas possible avec la fuzzy toolbox). Dans le programme, l'utilisateur sera invité à définir les différents cas d'études. Il y a dans le programme, une ligne décalant de + 2 heures ce que l'utilisateur rentre en moment de la journée.

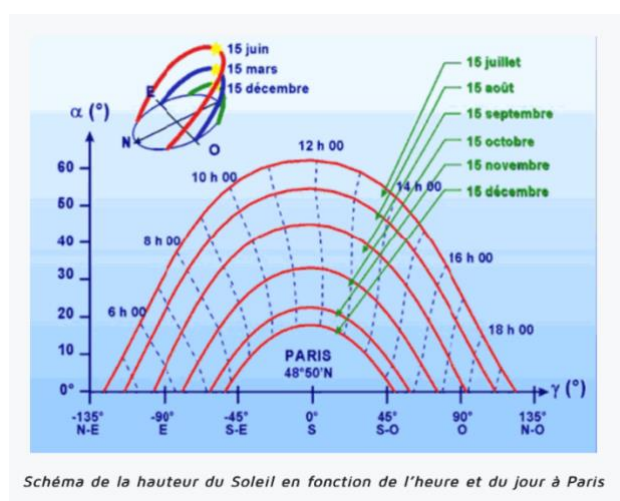
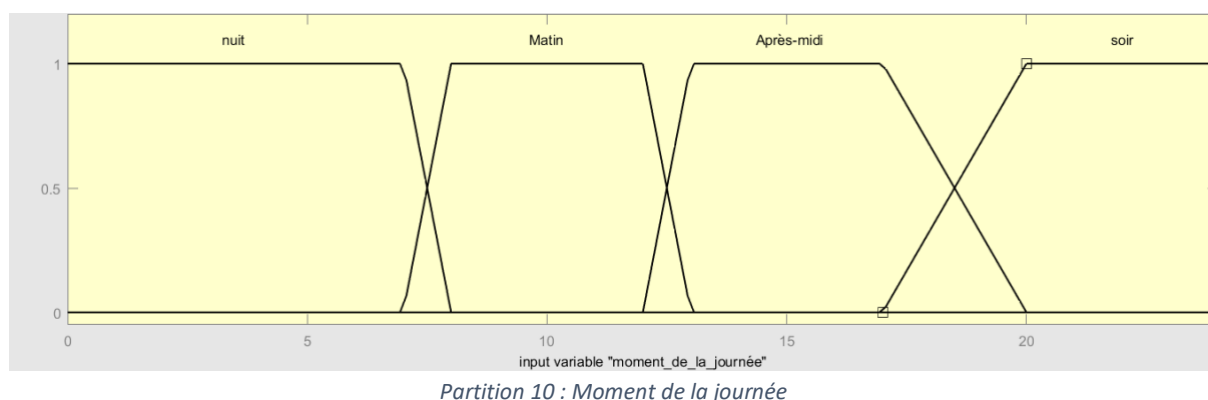


Figure 4 : inclinaison et orientation des rayons du soleil en fonction de la saison et du moment de la journée (cf bibliographie)



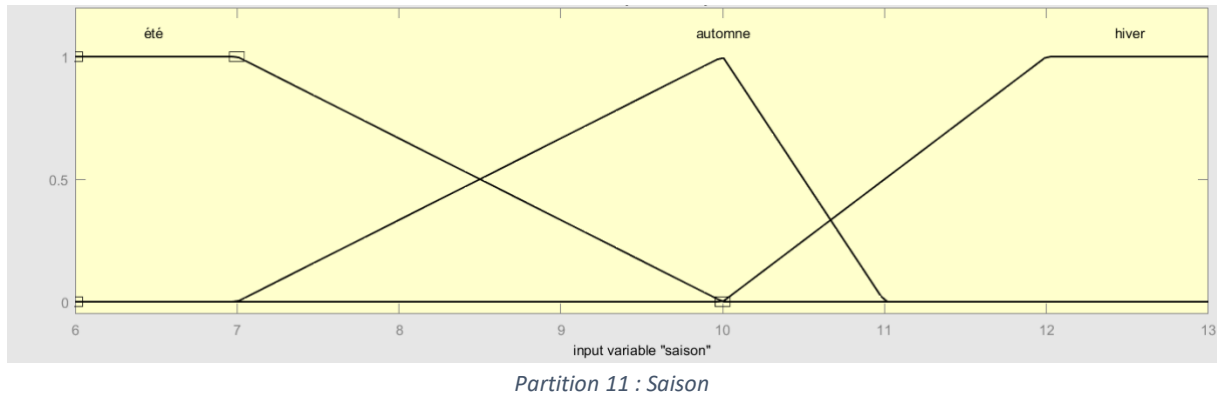
Variable d'entrée SF6 : Saison

En fonction du moment de la journée, selon l'**optimisation de panneau solaire** choisie, on aura un écart par rapport à la configuration optimale pour ce mois de l'année. Cette variable est définie par trois classes floues à savoir :

- Hiver = [10 12 13 13]

- Automne = [7 10 10 11]
- Été = [6 6 7 10]

Ce regroupement a été réalisé afin de simplifier le problème. On choisit l'univers du discours : $X = [6,13[$; représentant les mois de l'année. Comme il y a une symétrie de la position du soleil dans le ciel, on ne traite que la moitié de l'année. Nous utiliserons des intervalles fermés dû aux limites de la fuzzy toolbox.



Règles SF6 : Electricité maximale théorique produite par panneau

En sortie, comme nous l'avons énoncé précédemment nous obtenons une variable floue : **électricité maximale théorique produite par panneau**. Cette variable est définie par quatre classes floues que sont : « Nulle, Faible, Moyenne, Importante ».

Les règles suivent ces lois :

- Pas de soleil lorsque saison = hiver et moment de la journée = soir,
- A midi une production d'électricité toujours supérieure ou égale aux autres horaires.

Saison = été

Optimisation panneaux solaires	Est	Sud	Ouest
Moment de la journée			
Matin	Moyenne	Moyenne	Faible
Après-midi	Moyenne	Importante	Moyenne
Soir	Faible	Moyenne	Moyenne
Nuit	Nulle	Nulle	Nulle

Saison = automne

Optimisation panneaux solaires	Est	Sud	Ouest
Moment de la journée			
Matin	Faible	Faible	Faible
Après-midi	Faible	Moyenne	Faible
Soir	Nulle	Faible	Faible

Saison = hiver

Optimisation panneaux solaires	Est	Sud	Ouest
Moment de la journée			
Matin	Faible	Faible	Nulle
Après-midi	Faible	Moyenne	Faible
Soir	Nulle	Nulle	Nulle
Nuit	Nulle	Nulle	Nulle

Table de décision 6 : Electricité maximale théorique produite par panneau

7) SF7 : Production d'électricité solaire

Pour ce système flou, nous avons **trois** variables floues en entrée à savoir :

Variable d'entrée SF7 : Électricité maximale par panneau

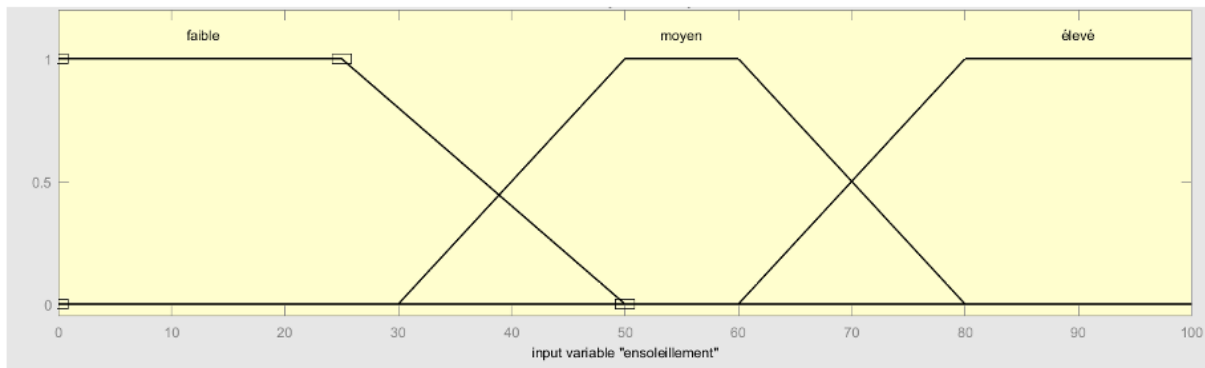
Sortie du SF6.

Variable d'entrée SF7 : Ensoleillement

Définit en pourcentage le taux d'ensoleillement sur la période considérée (30 min sur 1h à 50%). Cette variable est définie par trois classes floues à savoir :

- Faible = [0 0 25 50]
- Moyen = [30 50 60 80]
- Elevé = [60 80 100 100]

L'univers du discours est $X = [0 \ 100] \%$. Ces classes sont représentées par des IFT normaux sur X .



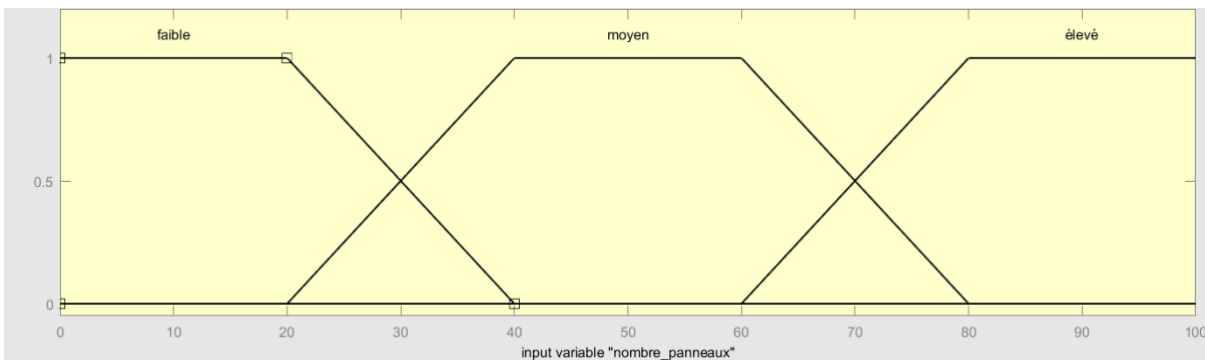
Partition 12 : Ensoleillement

Variable d'entrée SF7 : Nombre de panneaux

Définit le nombre de panneaux solaires comparativement aux besoins moyens de l'immeuble. (Cette variable serait à améliorer dans de futurs développements afin de prendre en compte les différents besoins en fonction de la période de l'année, de la journée, etc... Via éventuellement le besoin en électricité immeuble : sortie du SF7). Cette variable est définie par trois classes floues à savoir :

- Faible = [0 0 20 40]
- Moyen = [20 40 60 80]
- Elevé = [60 80 100 100]

L'univers du discours est $X = [0 \ 100] \%$. Ces classes sont représentées par des IFT normaux sur X .



Partition 13 : Nombre de panneaux

Règles SF7 : Production d'électricité solaire

Ce système d'inférence flou sort une variable floue en sortie : **production d'électricité solaire**. Cette variable floue est définie par quatre classes floues que sont : « Nulle, Faible, Moyenne, Elevée. »

Plusieurs remarques :

- On se contente d'électricité solaire car notre système est défini pour un univers du discours de type « quartier ». Il semble peu probable qu'il y ait d'autres sources d'énergie à prendre en compte.
- Ce système permet de dire ce qui sera produit à un instant t en tenant compte des imprécisions relatives aux informations. Le smart grid étant un système qui cherche à optimiser le flux et la consommation d'électricité à tout instant étant donné la nature non stockable de l'électricité (vecteur d'énergie), ce SF est particulièrement important. Bien sûr, il est possible de stocker de l'énergie après conversion comme détaillé dans le SF8 mais dans la cadre de la sobriété énergétique le temps réel et l'optimisation du flux est prioritaire sur le stockage car tout ce qui n'est pas stocké est lié à une quantité d'énergie supplémentaire non négligeable.

Construction des règles :

- La caractérisation nulle d'une variable en entrée entraîne la caractérisation nulle en sortie.
- Le nombre de panneaux est plus important que les deux autres variables.

Nombre de panneaux = Faible

Ensoleillement	Faible	Moyen	Élevé
Électricité maximale par panneau			
Nulle	Nulle	nulle	Nulle
Faible	Faible	Faible	Moyenne
Moyenne	Faible	Moyenne	Moyenne
Importante	Moyenne	Moyenne	Moyenne

Nombre de panneaux = Moyen

Ensoleillement	Faible	Moyen	Élevé
Électricité maximale par panneau			
Nulle	Nulle	Nulle	Nulle
Faible	Faible	Moyenne	Moyenne
Moyenne	Moyenne	Moyenne	Moyenne
Importante	Moyenne	Moyenne	Élevée

Nombre de panneaux = Élevé

Ensoleillement	Faible	Moyen	Élevé
Électricité maximale par panneau			
Nulle	Nulle	Nulle	Nulle
Faible	Moyenne	Moyenne	Moyenne
Moyenne	Moyenne	Moyenne	Élevée
Importante	Moyenne	Élevée	Élevée

Table de décision 7 : production d'électricité solaire

8) SF8 : électricité disponible

Pour ce système, nous avons **deux** variables floues en entrée à savoir :

Variable d'entrée SF8 : Production d'électricité solaire

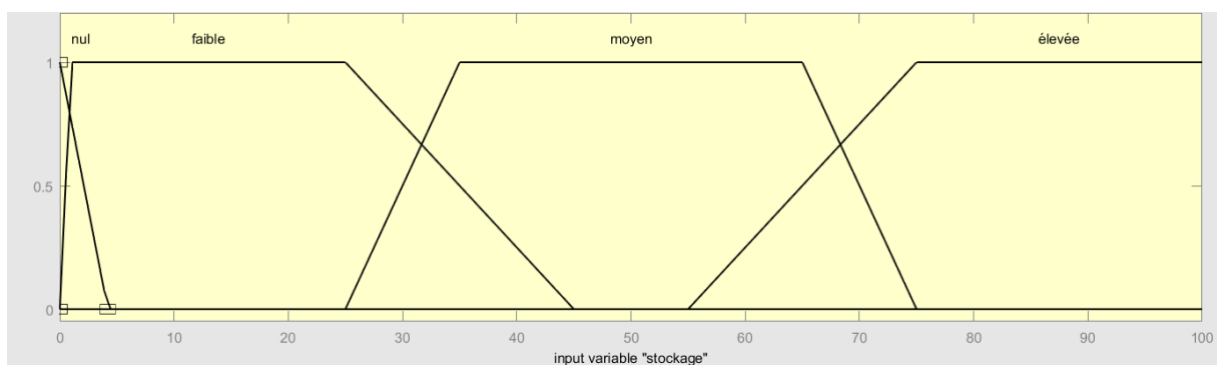
Sortie du SF7.

Variable d'entrée SF8 : Stockage

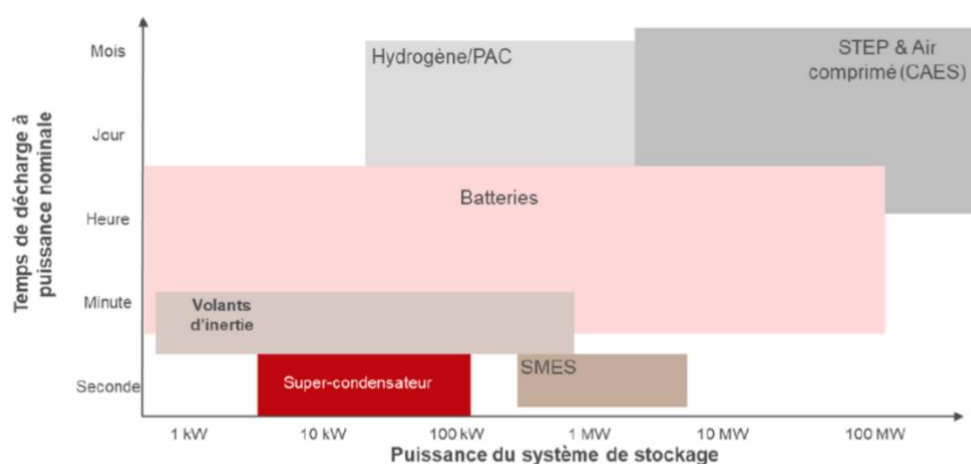
Définit la capacité de stockage d'un agent (immeuble). Cette variable est définie par quatre classes floues à savoir :

- Nul = [0 0 4.2]
- Faible = [0 1 25 45]
- Moyen = [25 35 65 75]
- Elevé = [55 75 100 100]

L'univers du discours est $X = [0\ 100]\%$. Considérant notre univers du discours global (quartier), certaines technologies comme les stations de transfert d'énergie par pompage (STEP) et le stockage par air comprimé ne pourront pas être utilisées. Cette variable définit la quantité d'électricité stockée comparativement aux besoins de l'immeuble sur une journée. Cette variable serait à améliorer dans de futurs développements en comparant le stockage d'électricité à la sortie du SF5 (besoin en électricité immeuble).



Partition 14 : Stockage



Source : Analyses E-CUBE Strategy Consultants

Figure 5 : Caractéristique de différentes technologies de stockage d'énergie ayant servi à la caractérisation de la variable "stockage" (cf bibliographie)

Règles SF8 : électricité disponible

Ce système d'inférence flou sort une variable floue en sortie : **électricité disponible**. Cette variable est définie par quatre classes floues : « Nulle, Faible, Moyenne, Elevée ».

Construction des règles :

- La production d'électricité solaire est plus importante que le stockage car le système smart grid préférera toujours l'optimisation des flux à l'utilisation du stockage.
- La qualification nulle est neutre si l'autre qualification est faible.

Stockage	Nul	Faible	Moyen	Élevé
Production d'électricité solaire	Nul	Faible	Moyen	Élevé
Nulle	Nulle	Faible	Faible	Faible
Faible	Faible	Faible	Faible	Moyenne
Moyenne	Faible	Moyenne	Moyenne	Moyenne
Élevée	Moyenne	Moyenne	Élevée	Élevée

Table de décision 8 : électricité disponible

Une possible amélioration du système global (smart grid system) serait la prise en compte de l'**impact** (sur l'électricité disponible à un instant t pour notre agent) **d'incidents extérieurs** à l'agent. L'univers du discours serait alors $X = [0 \ 100] \%$. On évalue alors l'impact de l'incident : 100% étant la déconnexion de l'agent (immeuble) du réseau smart grid.

9) SF9 : Tension immeuble

Pour ce système, nous avons **deux** variables floues en entrées à savoir :

Variable d'entrée SF9 : Besoin en électricité de l'immeuble

Sortie du SF5.

Variable d'entrée SF9 : Électricité disponible

Sortie du SF8.

Règles SF9 : Tension immeuble

Ce système d'inférence flou sort une variable floue en sortie : **tension immeuble** qui donne la tension sur le besoin d'électricité dans l'immeuble. Cette variable floue est définie par trois classes floues que sont : « Faible, Moyen et Elevé ».

SF9 : tension immeuble			
Besoin en électricité immeuble	Faible	Moyen	Elevé
Electricité disponible			
nulle	élevée	élevée	élevée
faible	moyenne	élevée	élevée
moyenne	faible	moyenne	élevée
élevée	faible	moyenne	moyenne

Table de décision 9 : Tension immeuble

10) Agrégation des tensions immeubles

Formule pour l'agrégation des sorties SF9, ceci va nous permettre de donner plus de poids à l'immeuble qui a la plus forte tension et donc avoir une sortie qui va surévaluer les besoins. C'est une moyenne qui donne plus de poids à la valeur la plus élevée. Il s'agit d'un principe de prudence.

$$\text{Agrégation Tensions Immeubles} = \frac{1+c}{2c+N(1-c)} V_{i \leq N} B_i + \frac{1-c}{2c+N(1-c)} \left[\left(\sum_{i=1}^N B_i \right) - V_{i \leq N} B_i \right]$$

B_i conséquence nette Tension Immeuble, N le nombre d'immeubles,
 c le déséquilibre introduit

11) SF10 : Production d'électricité solaire

Dans cette partie, de nombreux acronymes vont être utilisés. En voici la liste :

- IMP => importation
- EXP => exportation
- IC => increase consumption (de certains appareils)

- DC => decrease consumption (de certains appareils)
- V2G => vehicle to grid (utilisation de l'électricité disponible sur les véhicules)
- G2V => grid to vehicle (stockage d'électricité sur les véhicules en plus de leur recharge)
- AM => Aucune Mesure

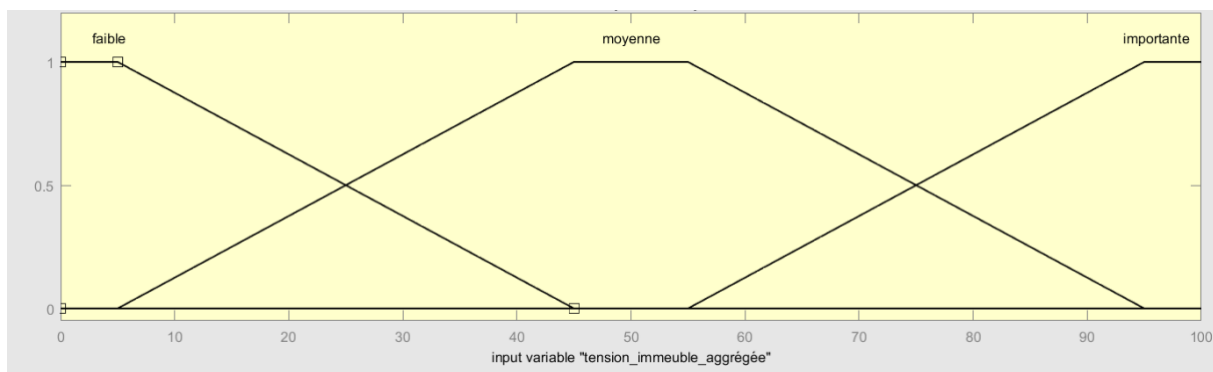
Pour ce système, nous avons **trois** variables floues en entrées à savoir :

Variable d'entrée SF10 : Tension immeuble agrégée

L'univers du discours est défini sur [0 100] %. En étant inférieur à 50, nous sommes en surplus global d'électricité et en étant supérieur à 50, nous sommes en manque global d'électricité. Il s'agit d'un univers du discours relatif à la tension maximale absolue.

Cette variable est définie par **trois** classes floues à savoir :

- Faible = [0 0 5 45]
- Moyenne = [5 45 55 95]
- Importante = [55 95 100 100]



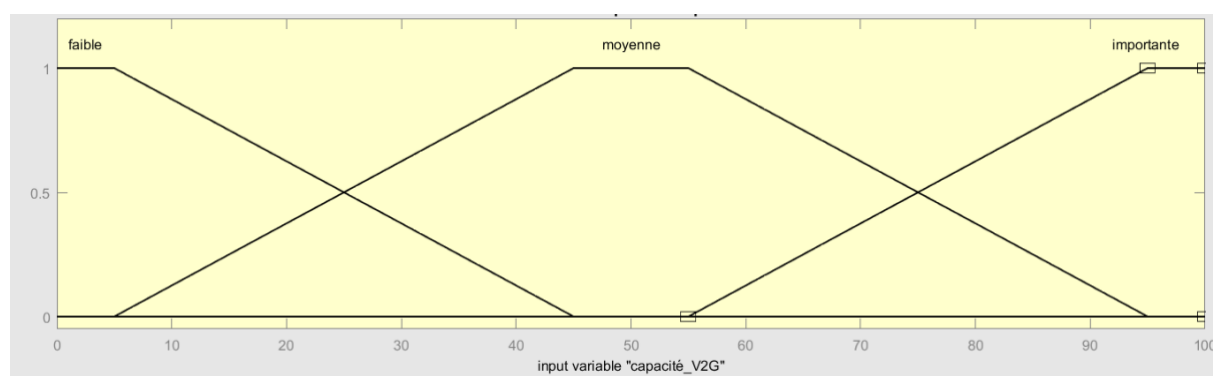
Partition 15 : Tension immeuble agrégée

Variable d'entrée SF10 : Capacité V2G

Cette variable est définie par **trois** classes floues à savoir :

- Faible = [0 0 5 45]
- Moyenne = [5 45 55 95]
- Elevée = [55 95 100 100]

La capacité V2G définit l'électricité actuellement stockée sur le réseau de stockage Vehicle to Grid (V2G) / Grid to Vehicle. Cette capacité dépend du moment de la journée (heure pleine/creuse) et du moment de l'année. Elle est définie ici en % par rapport à la capacité maximale V2G. L'univers du discours est [0 ;100] %. Une capacité élevée signifie peu de possibilité de stocker sur le réseau V2G mais à contrario la possibilité de rendre de l'électricité au réseau sera importante.



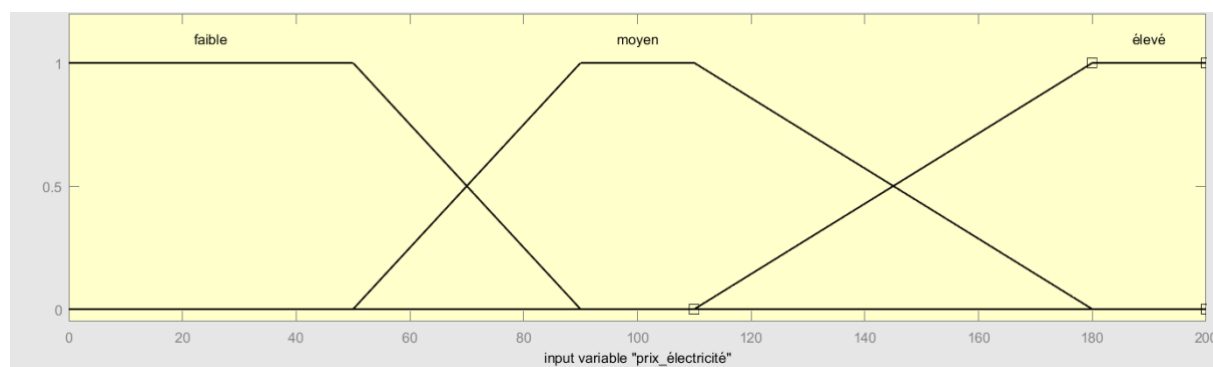
Partition 16 : capacité V2G

Variable d'entrée SF10 : Prix de l'électricité

Cette variable est définie par **trois** classes floues à savoir :

- Faible = [0 0 50 90]
- Moyen = [50 90 110 180]
- Elevé = [110 180 200 200]

Cette variable est définie comme le rapport du prix de revente de l'électricité sur le prix d'achat (tarif réglementé) de l'électricité. Si nous avons eu le temps de la définir correctement, il s'agirait d'une agrégation sur l'ensemble des contrats des immeubles (d'achat et de revente) puis d'une fuzzyfication de ces deux agrégations suivies d'un SF. L'univers du discours est défini sur [0 ; 200] % (le prix de revente peut dans certain cas être supérieur à celui d'achat). Pour le partitionnement, nous nous sommes aidés des tarifs EDF actuels pour l'achat et la revente d'électricité (abonnements). A noter que pour la revente d'électricité solaire, les tarifs varient de manière trimestrielle. Pour une telle variable, un partitionnement discret aurait pu être plus approprié.



Partition 17 : prix de l'électricité

Règles SF10 : Mesures

Ce système d'inférence flou sort une variable floue en sortie : **Mesures** qui donnent les mesures à prendre en fonction de la tension réseau, la capacité V2G et le prix de l'électricité. Cette variable floue est définie par 8 classes floues que sont : **G2V-EXP-IC**, **G2V-EXP**, **EXP**, **G2V**, **V2G**, **IMP**, **V2G-IMP**, **V2G-IMP-DC**.

Construction des règles :

- Prépondérance de la tension immeuble sur la capacité V2G.

Capacité V2G = faible

Tension immeuble agrégée	Faible	Moyenne	Importante
Prix de l'électricité			
Faible	G2V	V2G-IMP	V2G-IMP-DC
Moyenne	G2V	V2G-IMP	V2G-IMP-DC
Élevé	G2V-EXP	IMP	V2G-IMP

Capacité V2G = moyenne

Tension immeuble agrégée	Faible	Moyenne	Importante
Prix de l'électricité			
Faible	G2V	G2V	V2G
Moyen	G2V-EXP	G2V-EXP	V2G-IMP
Élevé	EXP	EXP	IMP

Capacité V2G = importante

Tension immeuble agrégée	Faible	Moyenne	Importante
Prix de l'électricité			
Faible	G2V-EXP-IC	G2V-EXP	V2G
Moyen	G2V-EXP-IC	G2V-EXP	V2G
Élevé	G2V-EXP	EXP	IMP-V2G

Table de décision 10 : Mesures

IV. Algorithme utilisé

L'algorithme utilisé est l'algorithme de Zalila généralisé. La T-norme utilisée est le min afin de conserver l'idempotence. C'est aussi la plus simple à mettre en œuvre et nous n'avons pas trouvé d'intérêt particulier à choisir une autre T-norme. L'implication est modélisée par le min (pseudo-implication).

$$B' = \bigcup_i \left(\left(\bigcap_j h(A'_j \cap A_{ji}) \right) \langle T \rangle B_i \right)$$

Figure 6 : Algorithme de Zalila généralisé - Cours 5-22

Les algorithmes utilisés sont ceux deux algorithmes dérivés du Zalila généralisé :

- Le Zalila régression car nous avons besoin d'une valeur numérique afin de faire l'agrégation des tensions. A cet effet, la défuzzyfication utilisée est celle par valeur modale car nous nous sommes rendu compte que la fonction d'appartenance de la conséquence floue finale « tension immeuble » n'était pas convexe. Cependant cela pourrait être sujet à discussion car avec cette défuzzyfication, nous obtiendrons toujours la même valeur numérique à partir du moment où nous sommes dans le noyau d'une des classes floues de « tension immeuble ». Une analyse de la convexité plus poussée pourrait être utile en analysant la forme de la courbe à chaque calcul de la conséquence floue finale « tension immeuble » et en choisissant automatiquement en fonction de la convexité, la méthode barycentrique ou la méthode modale. À noter que combiner cette méthode par une alpha coupe adaptative pourrait être utile afin de ne garder que les conséquences floues partielles les plus sûres.
- Le Zalila classification afin d'avoir les mesures finales conseillées.

Comme indiqué ci-dessus, une défuzzyfication des tensions immeubles a été réalisée afin de les agréger (méthode définie plus haut). Après cette agrégation, on fuzzyfie l'agrégation des tensions immeubles (tension réseau). Afin d'éviter une perte d'information, il serait préférable d'agréger les tensions immeubles avec un calculateur d'arithmétique floue. C'est un axe d'amélioration de l'algorithme.

V. Description du programme et axes d'amélioration

A. Description du programme

Le programme que nous avons conçu pour réaliser les études de cas de notre système flou pour smart grid comporte 6 fichiers.

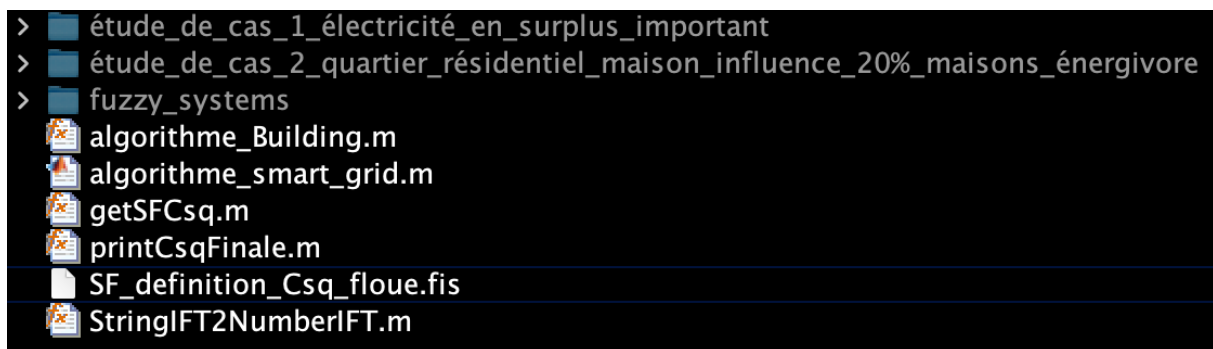


Figure 7 : ensemble des fichiers du programme smart grid

Le programme se lance à partir du fichier principale nommé « algorithme_smart_grid.m ». Ce dernier réalise l'interaction entre les différents immeubles. On y trouve notamment le SF10. Tous les éléments externes à la caractérisation d'un immeuble y sont regroupés. On y fait appel à une fonction décrite dans le fichier « algorithme_Building.m ».

Cette fonction est chargée de décrire un immeuble. On y définit toutes les caractéristiques internes à un immeuble. Le programme permet de gérer les IFT grâce au fichier « getSFCsq.m ». Ce dernier est utilisé à la fois dans le fichier « algorithme_smart_grid.m » et le fichier « algorithme_Building.m » (pour chaque SF).

Pour mieux analyser les résultats, il nous a semblé intéressant d'afficher 2 conséquences floues finales en particulier : celle du SF9 (car on y réalise une défuzzification) des différents immeubles et celle du SF10. Pour cela, nous utilisons « printCsqFinale.m » qui réalise une discrétisation sur l'univers du discours et qui à partir d'un fichier nommé « SF_definition_Csq_floue.fis » (2 entrées pour définir les deux conséquences floues finales) affiche sous forme graphique les conséquences floues finales. Les entrées du système flou qui nous permettent d'afficher les conséquences floues finales ont été définies de la manière suivante :

- Suppression de toutes les classes floues mises par défaut par le module fuzzy toolbox lors de l'ajout d'une variable en entrée d'un SF,

- Ajout du nombre de variables souhaitées.

En faisant cela, la fuzzy toolbox « égalise » les classes floues sur l'univers du discours ce qui permet d'avoir un affichage appréciable.

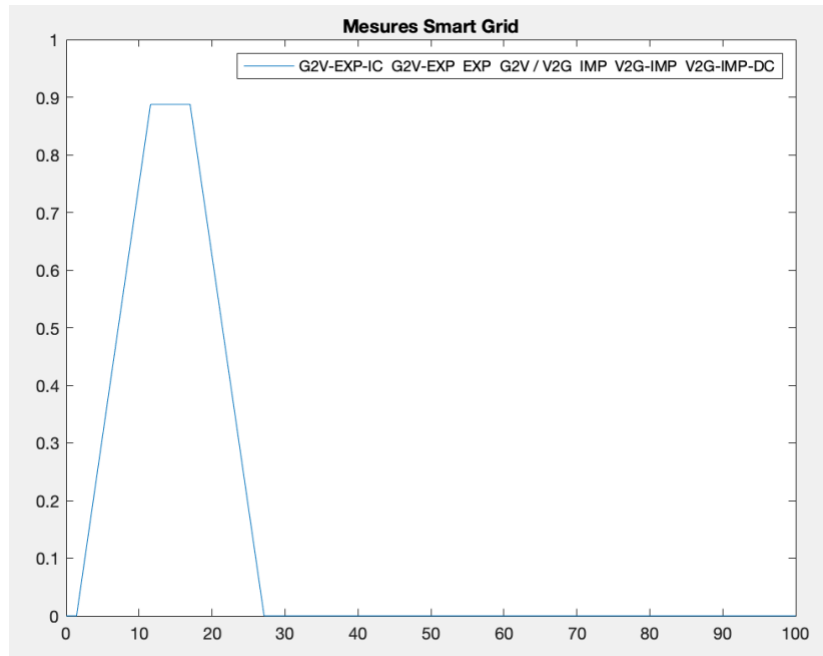


Figure 5.2 : exemple d'affichage graphique de conséquence floue finale

Le programme réalise également via certaines fonctions, l'enregistrement dans un dossier puis dans un fichier texte de la caractérisation (variable d'entrée et leur valeur) de chaque immeuble (un fichier texte par immeuble). Enfin, on enregistre également la conséquence défuzzifiée de chaque immeuble dans un unique fichier binaire dans le même dossier.

```

data_immeuble_1_étude_de_cas_2_quartier_résidentiel_maison_influence_20%_maisons_énergivore.txt — Modifié
Confort chauffage : 18 18.5 18.75 19
Confort éclairage : 100 150 200 250
Superficie immeuble : 120 120 120 120
Densité de personnes : 15 18 21 24
Isolation thermique : 3.5 4 4.5 5
Humidité de l'air : 54 56 58 60
Température extérieure : 24 24 24 24
Moment de la journée : 12 12 12 12
Optimisation des panneaux solaires : 0 0 0 0
Saison : 10 10 10 10
Ensoleillement : 50 54 56 60
Nombre de panneaux : 70 72 74 76
Stockage : 70 72 74 76

```

Figure 5.3 : exemple de fichier text contenant les données d'un immeuble

Enfin, tous les SF ont été placés dans un dossier nommé fuzzy_systems pour plus de clarté.

```

Confort utilisateur = {(faible;0.28333),(moyen;0.92),(eleve;0),}
Besoin immeuble = {(faible;0.41667),(moyen;0.6),(eleve;0),}
Consommation énergétique = {(Très_Faible;0),(Faible;0.41667),(Moyenne;0.6),(Elevée;0),}
Conditions météo = {(Mauvaises;0),(Moyennes;0.16667),(Bonnes;1),}
Besoin en électricité = {(Faible;0.6),(Moyen;0),(Elevé;0),}
Electricité maximale par panneau = {(nulle;0),(faible;0),(moyenne;1),(importante;0),}
Production d'électricité solaire = {(nulle;0),(faible;0),(moyenne;0.656),(élevée;0),}
électricité disponible = {(nulle;0),(faible;0),(moyenne;0.656),(élevée;0),}
tension immeuble = {(faible;0.6),(moyenne;0),(élevée;0),}

nameOfFinalCsq =
    'Mesures Smart Grid'

Mesures Smart Grid = {(G2V-EXP-IC;0.5),(G2V-EXP;0.8875),(EXP;0.5),(G2V;0.5),(V2G;0),(IMP;0.1625),(V2G-IMP;0.1625),(V2G-IMP-DC;0),}

```

Figure 5.4 : Affichage des différentes conséquences floues finales dans la fenêtre de commande

B. Axes d'amélioration

Pour l'instant, notre programme demande à l'utilisateur de saisir les caractéristiques de chaque immeuble. Mais certaines caractéristiques, comme la météo sont communes à tous les immeubles. Certaines caractéristiques seraient donc à définir plus haut dans la hiérarchie du programme.

Certaines étapes comme l'invitation à entrer la valeur des variables du système sont à la fois utilisées dans le programme « `algorithm_smart_grid.m` » et « `algorithm_Building.m` » sans faire l'objet d'une fonction. Pour l'intelligibilité du programme, il serait préférable de créer une fonction pouvant être réutilisée dans les deux algorithmes.

Il existe un ou deux nombres magiques dans le programme qu'il faudrait modifier toujours pour l'intelligibilité du programme.

Actuellement, et par manque de temps, notre programme enregistre seulement les données de chaque immeuble et pas celles du réseau. Afin d'avoir un meilleur suivi de nos cas d'étude, il serait intéressant d'ajouter cette extension ainsi que l'enregistrement automatique des figures qui se fait pour l'instant par capture d'écran.

VI. Cas d'étude

Dans cette dernière partie nous allons vérifier le bon fonctionnement de notre système flou à l'aide de 5 cas d'études. Dans chacun des cas on se limite à $N = 5$ bâtiments. Les données de chacun de ces cas d'études (variables d'entrées) sont données en annexe.

A. Cas n°1 : Cas électricité en surplus important

Présentation

Dans ce cas nous avons 5 bâtiments différents : une maison individuelle, un petit commerce, une résidence universitaire, un petit immeuble avec des bureaux, et un grand immeuble avec des bureaux. Chacun des bâtiments à ces caractéristiques propres.

Pour les variables communes à tous les immeubles, on a décidé de se placer en plein été avec un ensoleillement très important, une température élevée (environ 32,5 33,5 degrés), une humidité faible (environ 36, 37%) et entre 14h et 15h. Les variables capacité V2G et prix de l'électricité ont été choisie de façon à avoir une qualification plutôt élevée de ces variables.

Ainsi, on se place dans le cas d'une tension immeuble relativement faible, une capacité V2G élevée et un prix de l'électricité élevé ce qui devrait amener vers une qualification de la conséquence floue finale vers :

- G2V-EXP-IC,
- G2V-EXP,
- Ou EXP.

Résultats

Dans cette configuration notre système nous donne la conséquence finale suivante :

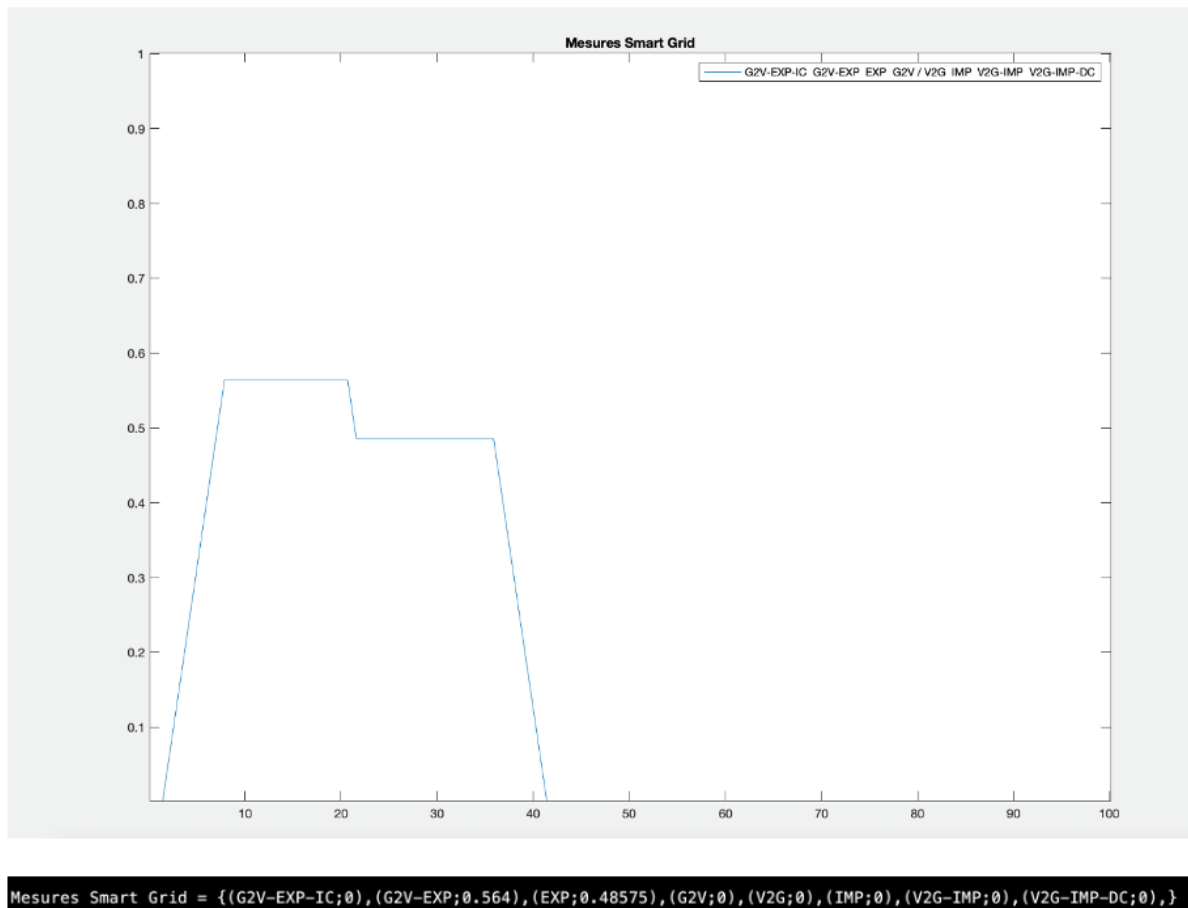


Figure 8 : Mesures cas d'étude 1

Les résultats sont ainsi bien en accord avec ce que nous pensions.

B. Cas n°2 : Analyse de l'influence de 20% de maisons énergivores dans un parc immobilier de maisons non énergivores sur les mesures prises

Présentation

Dans ce cas d'étude, nous voulons évaluer l'impact de 20% de maisons énergivores dans un quartier résidentiel avec des maisons non énergivores. Pour mesurer cet impact on dispose de 4 maisons identiques et d'une maison différente plus énergivore. On compare le résultat obtenu avec la même étude mais sans maison énergivore (la maison énergivore a été remplacé par la maison non énergivore). A noter que les variables prix de l'électricité et capacité V2G ont été définies par une qualification moyenne.

Résultats

Dans cette configuration notre système nous donne la conséquence finale suivante :

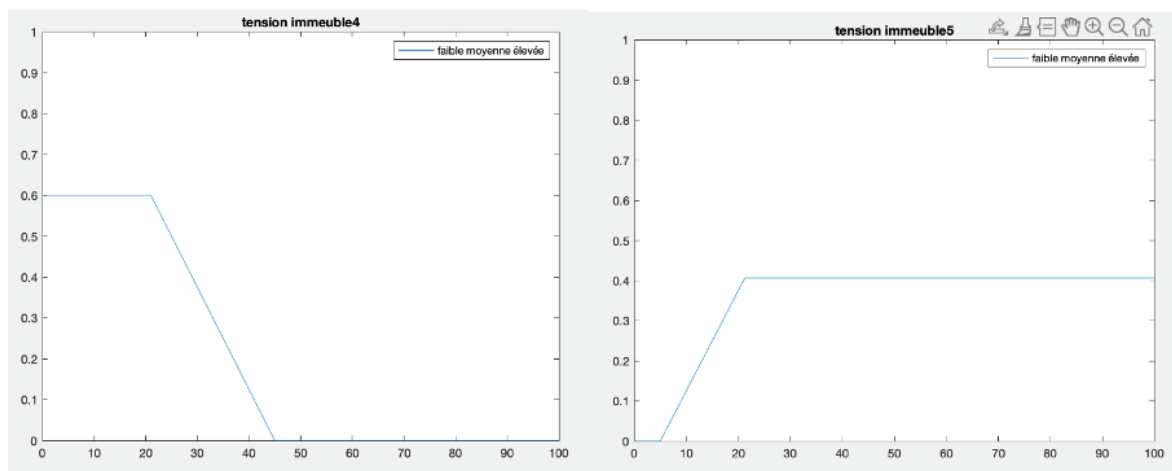
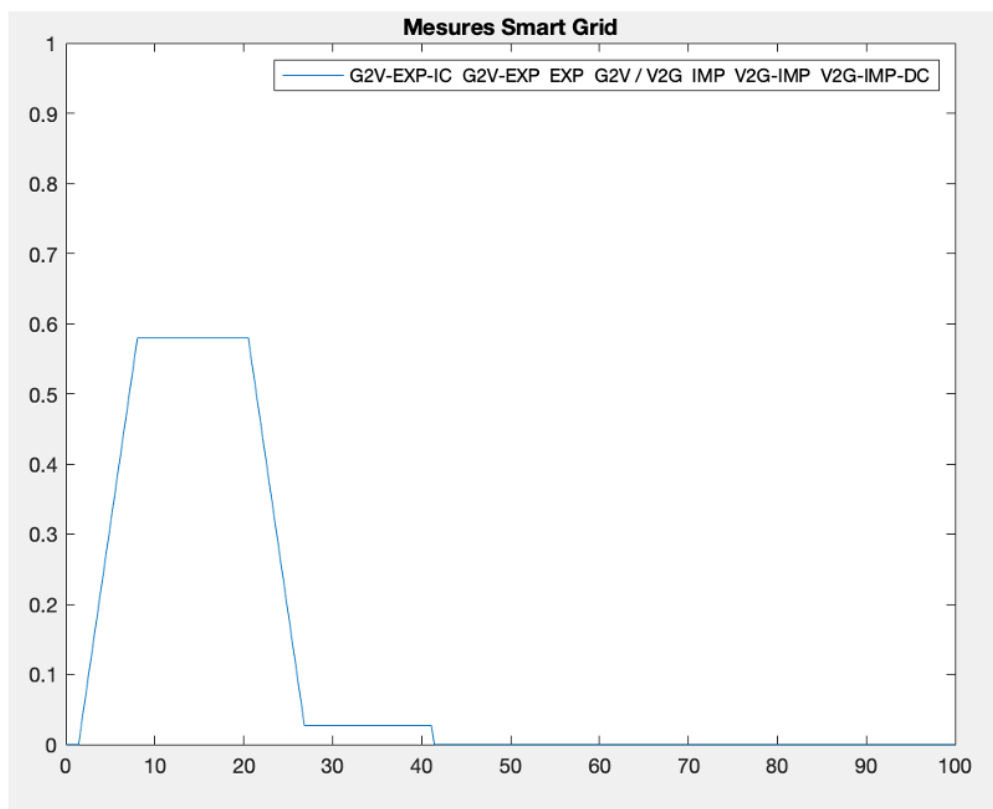
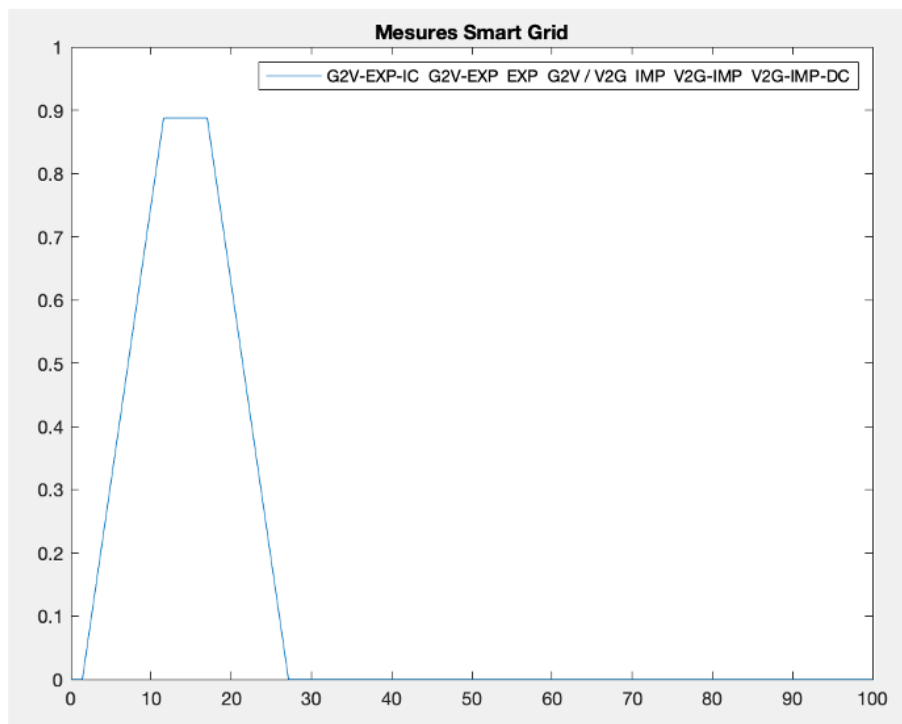


Figure 9 : cas d'étude 2 - comparaison de la tension immeuble d'un immeuble non énergivore (gauche) et d'un immeuble énergivore (droite)



Mesures Smart Grid = {(G2V-EXP-IC;0),(G2V-EXP;0.58),(EXP;0.027),(G2V;0),(V2G;0),(IMP;0),(V2G-IMP;0),(V2G-IMP-DC;0),}

Figure 10 : Mesures cas d'étude 2 - 4 maisons non énergivores et une maison non énergivore



Mesures Smart Grid = {(G2V-EXP-IC;0),(G2V-EXP;0.8875),(EXP;0),(G2V;0),(V2G;0),(IMP;0),(V2G-IMP;0),(V2G-IMP-DC;0),}

Figure 11 : Mesures cas d'étude 2 - 5 maisons non énergivores

On peut observer que les 20% de maisons énergivores modifient les mesures de manière cohérente puisqu'elles ont un impact mais pas disproportionné. Le déclenchement de la mesure EXP est plus important sans la maison énergivore qu'avec et la mesure EXP-V2G disparaît. Cela est normal car la tension de l'immeuble diminue : les mesures à prendre vont donc se décaler vers la gauche du graphique (mesure « de plus en plus forte vers l'exportation »). De plus, la qualification moyenne des deux autres variables va favoriser la conséquence floue partielle G2V-EXP. On peut aussi remarquer que la tension immeuble est la variable qui a la plus forte influence sur la prise de mesures (ce qui est logique de par la construction des règles). Enfin 5 mêmes agents tendent à rendre le système plus sûr de lui-même (0.8875), ce qui est logique.

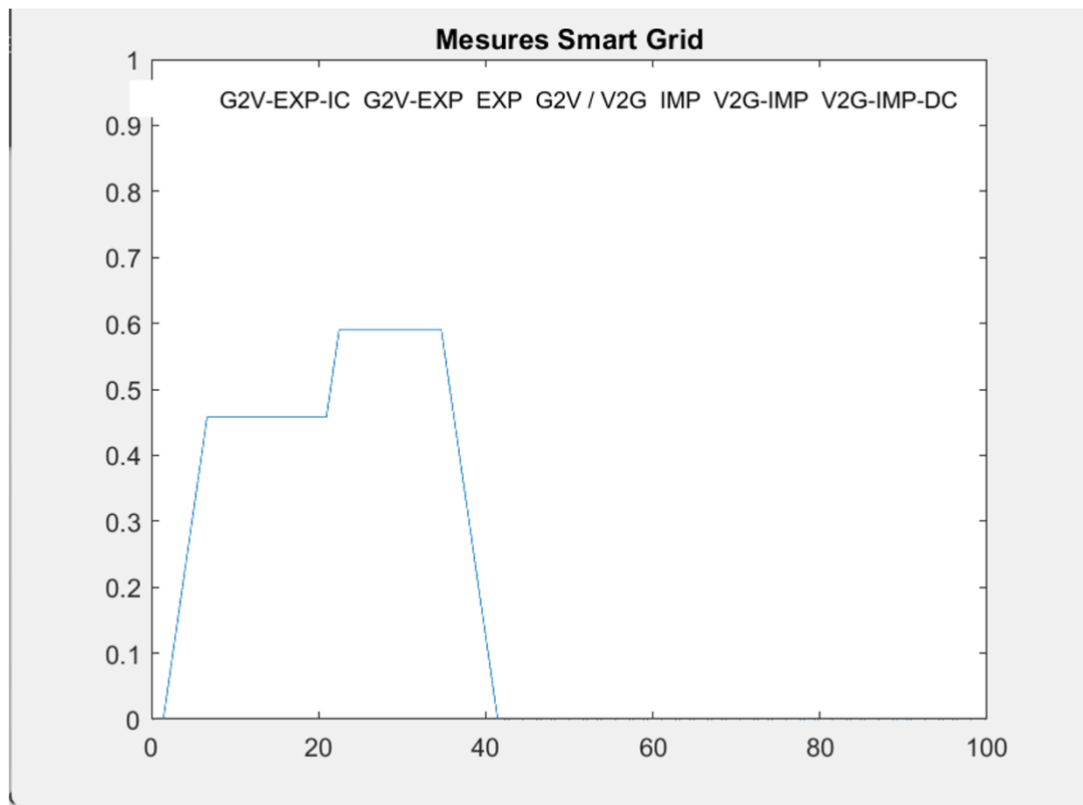
C. Cas n°3 :

Présentation

Ce cas d'utilisation est similaire au premier mais ici on modifie les paramètres climatiques c'est à dire on change de saison : on se place en Hiver. Il va sans dire que l'ensoleillement est plus faible en hiver et on reprend les mêmes bâtiments que ceux cités en étude 1.

Résultats

Dans cette configuration notre système nous donne la conséquence finale suivante :



Mesures Smart Grid = { (G2V-EXP-IC;0), (G2V-EXP;0.45875), (EXP;0.591), (G2V;0), (V2G;0), (IMP;0), (V2G-IMP;0), (V2G-IMP-DC;0), }

Figure 12 : Mesures cas d'étude 3

D. Cas n°4

Présentation

Dans ce quatrième cas d'étude nous disposons de 5 immeubles identiques de type HLM. Le confort utilisateur et le besoin immeuble seront variables d'un immeuble à autre. On se place cette fois en automne → saison : 10 10 10 10 qui ne varie pas.

On se place ici dans des situations moyennes voir moyennement élevées avec des capacités de stockage et un nombre de panneaux solaires moyens voir faibles pour chaque immeuble.

Résultats

Dans cette configuration notre système nous donne la conséquence finale suivante :

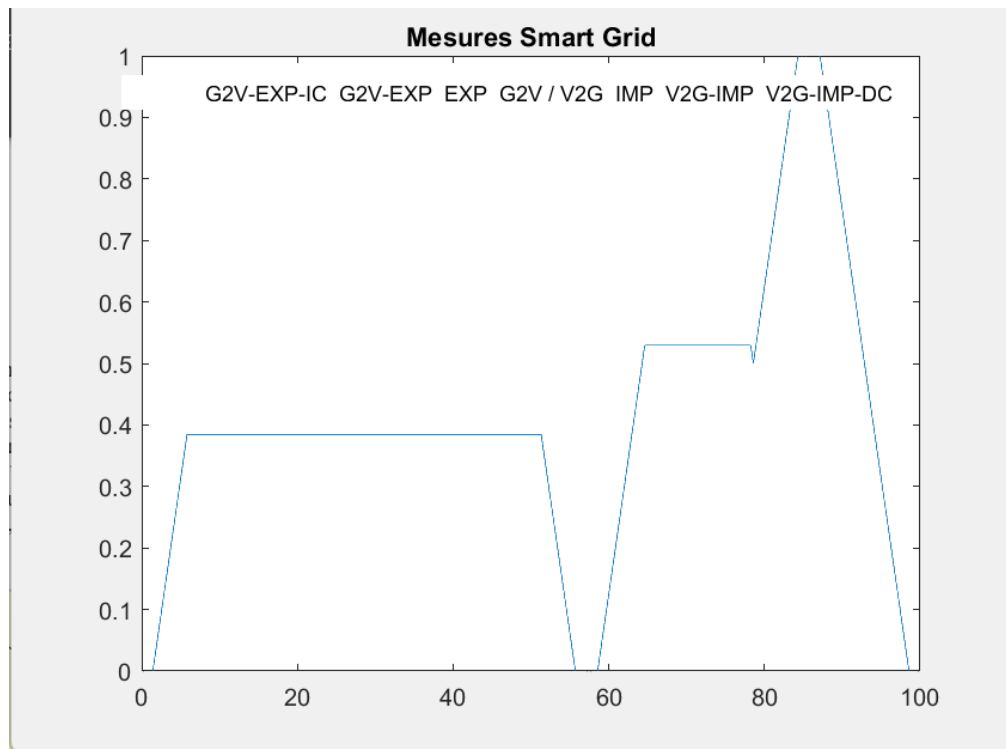


Figure 13 : Mesures cas d'étude 4

Mesures Smart Grid =

{{(G2V-EXP-IC;0),(G2V-EXP;0.3845),(EXP;0.3845),(G2V;0.3845),(V2G;0),(IMP;0.5294),(V2G-IMP;1),(V2G-IMP-DC;0),}}

E. Cas n°5

Présentation

Dans ce cas on étudie un système de Smart Grid dans un quartier de Carros.

Il faut savoir qu'il y a eu un projet Nice Grid lancé dans la ville de Carros en 2011 par ERDF l'actuel ENEDIS. Décidé officiellement le 17 juin 2011¹ et graduellement opérationnel depuis juin 2013, ce projet a été présenté au public le 30 août 2013, et vise à faire participer 2 500 foyers et entreprises à l'expérience ⁴, équipés de compteurs communicants Linky⁵. En outre, l'expérience comprend 200 sites où sont installés des panneaux photovoltaïques dont la capacité de production totale atteint 2,5 MWc. Pour gérer cette production d'électricité issue des énergies renouvelables, a été installé un système de stockage de l'électricité sous

forme de batteries, réparties en différents points du réseau électrique et chez les utilisateurs volontaires, capable d'accumuler 1 MW pendant 30 minutes⁶. Ce système de production photovoltaïque-stockage de l'électricité est utilisé dans un autre aspect du projet Nice Grid : l'expérimentation d'îlotage. Ce procédé consiste à faire fonctionner un quartier de Carros en complète autonomie, pendant un laps de temps déterminé, sans aucun apport d'électricité du réseau extérieur. [24]

On se place dans cette étude en hiver 2014 on recueille les données météo disponible sur la ville de Carros en 2014. [25]

Le quartier à l'étude se compose de 5 bâtiments : 2 maisons familiale identiques, 2 pavillons individuels et une villa. Le nombre de panneaux solaire n'est pas le même pour tous les immeubles, et la production en fonction des maisons variables, cependant ils ont la même orientation des panneaux solaire (sud). L'énergie solaire est la source d'énergie principale. Le climat est Méditerranéen (été chaud).

Résultats

Dans cette configuration notre système nous donne la conséquence finale suivante :

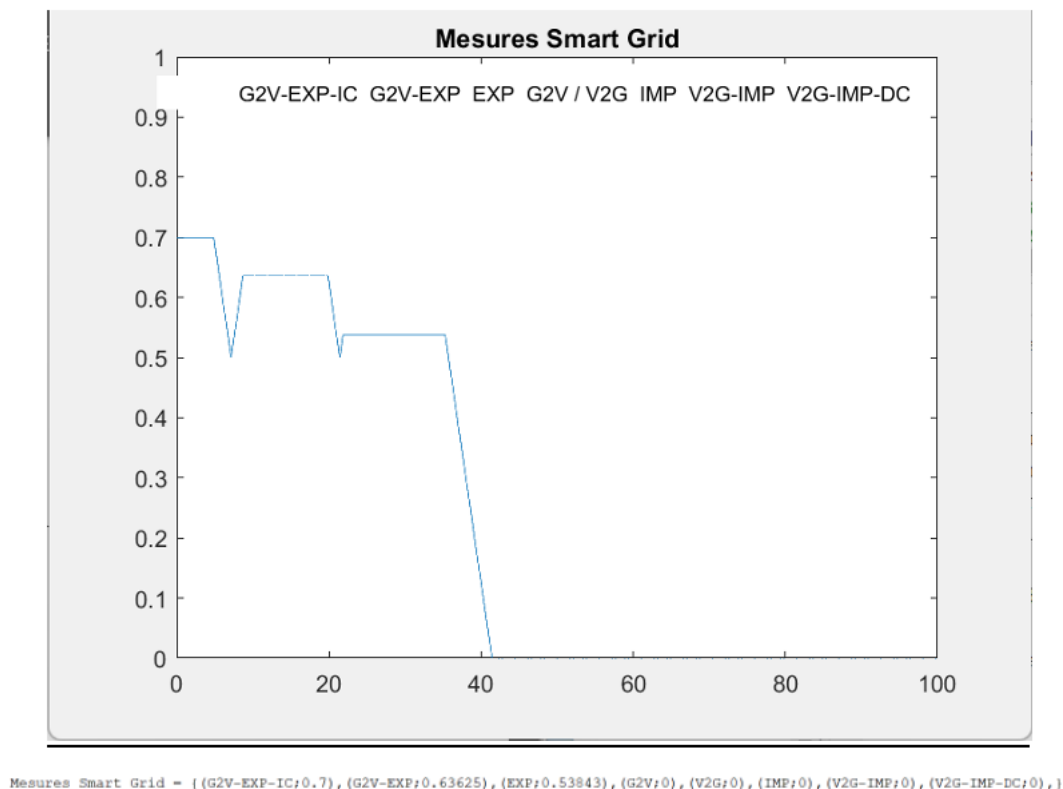


Figure 14 : Mesures cas d'étude 5

VII. Conclusion

À travers ce projet de théorie du flou nous avons réalisé la conception d'un système de Smart grid contrôlé à l'aide de l'IA floue. Ce projet a été très enrichissant pour nous car il nous a permis de mettre en d'appliquer le cours de théorie du flou sur un problème complexe et ainsi d'en comprendre toute l'utilité.

Dans cet exercice de style, qui a ses limites de par l'approche cartésienne que nous avons dû déployé de par la limitation de notre cerveau à penser des problèmes complexes de dimension très élevée. Ainsi certaine interaction non prises en compte ici ont peut-être une influence très significative.

L'utilisation de la logique pour ce genre de problème est un atout et permet d'atteindre des solutions beaucoup plus optimales. En effet, le système pour le contrôle de la smart grid fait appel au ressenti humain (confort chauffage, confort éclairage). De plus ce système anticipe sur l'état futur des variables d'entrées afin de prendre la meilleure mesure à l'instant t . Par définition ces données sont donc incertaines et la logique floue permet de ne pas perdre d'information contrairement à la logique classique.

De plus, c'est un problème fortement non linéaire ou il n'est pas possible d'utiliser le principe de superposition. La logique floue permet de traiter ce genre de problème. Le seul problème consiste en la robustesse car ce système est construit à la main et que nous avons dû faire de forte hypothèse et traiter ce problème par approche cartésienne. Une approche hybride : machine learning + logique floue (ou continue) permettrait d'avoir un modèle robuste.

Enfin ce système prenant des décisions impactant fortement la vie des personnes, il est absolument nécessaire qu'il soit intelligible et la logique floue, à base de règles si/alors, permet cela contrairement aux techniques d'IA connexionnistes.

En réunissant les 3 critères ci-dessus, notre système à peu de chance de répondre au critère de robustesse (car construit à la main) mais l'approche hybride, déjà mise en place et utilisée par la société intellitech (Compiègne) permettrait d'y répondre.

Les perspectives de ce projet et son apport à l'état de l'art sont l'apport à tout système décisionnel de collaboration entre agents débouchant sur une mesure (donc classification)

afin d'optimiser la ressource (matériel ou immatériel) utilisée par ces agents. Le système flou sera d'autant plus utile s'il s'agit d'une situation prenant en compte le ressenti utilisateur ou d'autre variable de type perceptif ou incertain (on rappelle que pour justifier la décision choisie, nous avons besoin d'intelligibilité, c'est-à-dire compréhensible par un être humain dans sa globalité et pas seulement explicable en des points discrets par une approximation linéaire). Dans le cas particulier des Smarts Grids avec un univers du discours différents, plus large (plus générique), ce travail pourra servir d'une base à une extension.

VIII. Bibliographie

Tout ce contenu nous est rendu possible grâce au cours de SY10 : Théorie du flou enseigné à l'UTC par le professeur Zyed ZALILA ; mais également grâce aux TP dispensés par notre chargé de TP Dimitri DESCHAMPS.

Nous nous sommes également aidé des ressources internet ci-dessous données pour chacune des parties du rapport :

Introduction

- [1] https://fr.wikipedia.org/wiki/R%C3%A9seau_%C3%A9lectrique_intelligent
- [2] <https://les-smartgrids.fr/smart-grids-projets-europe-france/>
- [3] <https://www.connaissancedesenergies.org/fiche-pedagogique/reseau-intelligent-smart-grid>

Etat de l'art

- [4] <https://www.connaissancedesenergies.org/fiche-pedagogique/reseau-intelligent-smart-grid#:~:text=Le%20premier%20syst%C3%A8me%20de%20mesure,la%20plateforme%20technologique%20%C2%AB%20Smartgrids%20%C2%BB.>
- [5] <https://particulier.edf.fr/fr/accueil/guide-energie/electricite/smartgrid-reseau-electrique-intelligent.html>
- [6] <https://ieeexplore.ieee.org/abstract/document/8010825>
- [7] <https://hal-univ-tours.archives-ouvertes.fr/hal-01580284> Submitted on 1 Sep 2017

Bibliographie des SFs

SF1

- [8] <https://leclairage.fr/norme-declairage-interieur-nf-en-12-464-1-2/>, échelle de l'éclairément
- [9] <https://flashmode.tn/magazine/comment-choisir-la-puissance-declairage-dune-piece/#:~:text=Quelle%20puissance%20pour%20%C3%A9clairer%20un,700%20lumens%20par%20m%C3%A8tre%20carr%C3%A9.>

SF2

- [10] <https://www.service-public.fr/particuliers/vosdroits/F34905>, concernant la surface minimum qu'il est possible de mettre en location.

[11] <https://www.journaldunet.fr/business/dictionnaire-du-marketing/1197973-gms-grande-et-moyenne-surface-definition-traduction-et-synonymes-de-l-acronyme/>, définition des moyennes et grandes surfaces.

SF3

[12] <https://www.toutsurlisolation.com/resistance-thermique-et-performance>

[13] <https://www.placo.fr/Reglementation/Reglementation-thermique/RT-dans-l-existant>

[14] <https://www.choisir.com/energie/articles/164651/le-logement-energivore-lidentifier-et-lameliorer-grace-aux-aides-de-letat>

SF4

[15] 2 min pour comprendre l'humidité de l'air - YouTube

[16] <https://fr.wikipedia.org/wiki/Température>

SF6

[17] <https://www.choisir.com/energie/articles/137322/choisir-lorientation-et-linclinaison-de-panneaux-solaires-le-guide-complet>, lien concernant l'orientation et l'inclinaison des panneaux solaires.

[18] <http://www.vaucanson.org/php5/Accueil/index.php/comment-optimiser-l-energie-solaire-recuperee/711-l-inclinaison-du-four-a-t-elle-une-importance-dans-l-energie-solaire-recuperee>, lien concernant la position du soleil dans le ciel en fonction du mois de l'année et de l'heure de la journée.

SF8

[19] <https://nfp-energie.ch/fr/dossiers/191/cards/297>, concernant les différentes possibilités de stockage d'énergie.

[20] <https://www.hellowatt.fr/panneaux-solaires-photovoltaïques/stockage-autoconsommation-solaire>

[21] <https://www.smartgrids-cre.fr/encyclopedie/le-stockage-delectricite/les-differentes-technologies-stationnaires-de-stockage-de-lelectricite>, concernant les différentes possibilités de stockages

SF10

[22] <https://www.kelwatt.fr/prix>, lien concernant le prix à l'achat de l'électricité.

[23] <https://www.choisir.com/energie/articles/104297/quels-sont-les-tarifs-de-rachat-delectricite-photovoltaïque>, lien concernant le prix de vente d'électricité photovoltaïque.

Etude de cas 5

[24] [https://fr.wikipedia.org/wiki/Nice_Grid]

[25] <https://fr.weatherspark.com/h/s/148067/2014/3/M%C3%A9t%C3%A9o-historique-en-hiver-2014-%C3%A0-A%C3%A9roport-de-Nice-C%C3%B4te-d'Azur-France#Figures-Temperature>

IX. Annexes

Cas d'étude 1 : données d'entrée

Variables communes à tous les agents

Saison : (6.5 6.5 6.5 6.5)
Ensoleillement : (90 92 100 100)
Humidité de l'air : (35 36 37 39)
Température extérieure : (32 32.5 33.5 34)
Moment de la journée : (14 14.25 14.75 15)
Capacité V2G : (90 95 97 100)
Prix de l'électricité : (180 181 182 183)

Maison individuelle

Confort chauffage : (15 16 16 16)
Confort éclairage : (60 65 67 70)
Superficie immeuble : (160 160 160 160)
Densité de personnes : (0 0 16.87 16.87)
Isolation thermique : (2.5 2.75 3 3.25)
Optimisation des panneaux solaires : (-2 -0.5 0.5 2)
Nombre de panneaux : (70 74 76 80)
Stockage : (85 90 95 100)

Petit commerce

Confort chauffage : (16 19 21 22)
Confort éclairage : (75 100 1000 2000)
Superficie immeuble : (450 460 465 470)
Densité de personnes : (20 23 26 29)
Isolation thermique : (2.75 3 3.25 3.5)
Optimisation des panneaux solaires : (0 0 2 5)
Nombre de panneaux : (43 45 47 50)
Stockage : (50 52 54 56)

Résidence universitaire

Confort chauffage : (19.5 20 21 21.5)
Confort éclairage : (1750 1900 2000 2250)
Superficie immeuble : (5000 5000 5000 5000)
Densité de personnes : (13 15 18 20)
Isolation thermique : (8.5 8.75 9 9)
Optimisation des panneaux solaires : (0 4 6 10)
Nombre de panneaux : (75 80 85 90)
Stockage : (70 74 76 80)

Petit immeuble avec des bureaux

Confort chauffage : (19 19.5 20 20.5)

Confort éclairage : (2000 2050 2050 2100)
Superficie immeuble : (2000 2000 2000 2000)
Densité de personnes : (27 30 33 36)
Isolation thermique : (5.9 6.1 6.3 6.5)
Optimisation des panneaux solaires : (-1 0 0 1)
Nombre de panneaux : (55 57 58 60)
Stockage : (60 62 64 66)

Grand immeuble avec des bureaux

Confort chauffage : (19 19.5 20 20.5)
Confort éclairage : (2000 2050 2050 2100)
Superficie immeuble : (8000 8000 8000 8000)
Densité de personnes : (30 33 36 45)
Isolation thermique : (7.75 8 8.25 8.5)
Optimisation des panneaux solaires : (-8 -5 -3 0)
Nombre de panneaux : (55 57 58 60)
Stockage : (78 82 84 88)

Cas d'étude 2 : données d'entrée

Variables communes à tous les agents

Saison : (10 10 10 10)
Ensoleillement : (50 54 56 60)
Humidité de l'air : (54 56 58 60)
Température extérieure : (24 24 24 24)
Moment de la journée : (12 12 12 12)
Capacité V2G : (45 48 49 52)
Prix de l'électricité : (100 104 106 110)

Maison énergivore

Confort chauffage : (22.5 23 23.5 24)
Confort éclairage : (1700 1900 2100 2300)
Superficie immeuble : (120 120 120 120)
Densité de personnes : (45 55 65 75)
Isolation thermique : (1 1.4 1.6 2)
Optimisation des panneaux solaires : (80 84 86 90)
Nombre de panneaux : (5 7 9 11)
Stockage : (0 0 0 0)

Maisons non énergivores

Confort chauffage : (18 18.5 18.75 19)
Confort éclairage : (100 150 200 250)

Superficie immeuble : (120 120 120 120)
Densité de personnes : (15 18 21 24)
Isolation thermique : (3.5 4 4.5 5)
Optimisation des panneaux solaires : (0 0 0 0)
Nombre de panneaux : (70 72 74 76)
Stockage : (70 72 74 76)

Cas d'étude 3 : données d'entrée

Variables communes à tous les agents

Saison : (12.5 12.5 12.5 12.5)
Ensoleillement : (20 22 23 30)
Humidité de l'air : (30 50 50 70)
Température extérieure : (-7 -6 -4 1)
Moment de la journée : (12 12.25 12.75 13)
Capacité V2G : (90 95 97 100)
Prix de l'électricité : (180 181 182 183)

Petits bureaux

Confort chauffage : (19 19.5 20 20.5)
Confort éclairage : ((2000 2050 2050 2100)
Superficie immeuble : 2000 2000 2000 2000)
Densité de personnes : (27 30 33 36)
Isolation thermique : (5.6 6.1 6.3 6.5)
Optimisation des panneaux solaires : (-1 0 0 1)
Nombre de panneaux : (55 57 58 60)
Stockage : (60 62 64 66)

Petit commerce

Confort chauffage : (16 19 21 22)
Confort éclairage : (75 100 1000 2000)
Superficie immeuble : (450 460 465 470)
Densité de personnes : (20 23 26 29)
Isolation thermique : (2.75 3 3.25 3.5)
Optimisation des panneaux solaires : ((0 0 2 5)
Nombre de panneaux : (43 45 47 50)
Stockage : (50 52 54 56)

Résidence universitaire

Confort chauffage : (20.5 22 23 23.5)
Confort éclairage : (1750 1900 2000 2250)
Superficie immeuble : (5000 5000 5000 5000)
Densité de personnes : (13 15 18 20)
Isolation thermique : (8.5 8.75 9 9)

Optimisation des panneaux solaires : (0 4 6 10)
Nombre de panneaux : (75 80 85 90)
Stockage : (70 74 76 80)

Maison

Confort chauffage : (20 21 22 23)
Confort éclairage : (80 100 400 500)
Superficie immeuble : (160 160 160 160)
Densité de personnes : (0 0 16.87 16.87)
Isolation thermique : (2.5 2.75 3 3.25)
Optimisation des panneaux solaires : (-2 -0.5 0.5 2)
Nombre de panneaux : (70 74 76 80)
Stockage : (85 90 95 100)

Grand immeuble de bureau

Confort chauffage : (16 19 21 22)
Confort éclairage : (2000 2050 2050 2100)
Superficie immeuble : (8000 8000 8000 8000)
Densité de personnes : (30 33 36 45)
Isolation thermique : (7.75 8 8.25 8.5)
Optimisation des panneaux solaires : (-8 -5 -3 0)
Nombre de panneaux : (55 57 58 60)
Stockage : (78 82 84 88)

Cas d'étude 4 : données d'entrée

Variables communes à tous les agents

Saison : (10 10 10 10)
Ensoleillement : (35 50 55 65)
Humidité de l'air : (50 80 90 100)
Température extérieure : (6 7 10 16)
Moment de la journée : (14 16 17.5 18.5)
Capacité V2G : (0 2 5 30)
Prix de l'électricité : (60 90 100 200)

Immeuble 1

Confort chauffage : (23 23 23 23)
Confort éclairage : (3000 3500 4000 4500)
Superficie immeuble : (2000 2500 3000 3500)
Densité de personnes : (26 30 36 45)
Isolation thermique : (3 3.5 4.5 5)
Optimisation des panneaux solaires : (70 80 90 90)
Nombre de panneaux : (30 40 50 55)
Stockage : (30 40 45 55)

Immeuble 2

Confort chauffage : (16 16.5 17 18)
Confort éclairage : (75 100 1000 2000)
Superficie immeuble : (2000 2500 3000 3500)
Densité de personnes : (18 25 45 75)
Isolation thermique : (3 3.5 5 6)
Optimisation des panneaux solaires : (70 80 90 90)
Nombre de panneaux : (30 40 50 55)
Stockage : (30 40 45 55)

Immeuble 3

Confort chauffage : (16 19 21 22)
Confort éclairage : (75 100 1000 2000)
Superficie immeuble : (2000 2500 3000 3500)
Densité de personnes : (26 30 36 45)
Isolation thermique : (3 3.5 4.5 5)
Optimisation des panneaux solaires : (70 80 90 90)
Nombre de panneaux : (30 40 50 55)
Stockage : (30 40 45 55)

Immeuble 4

Confort chauffage : (22 23 23.5 24)
Confort éclairage : (3000 3500 4000 5000)
Superficie immeuble : (2000 2500 3000 3500)
Densité de personnes : (26 30 36 45)
Isolation thermique : (3 3.5 5 6)
Optimisation des panneaux solaires : (70 80 90 90)
Nombre de panneaux : (30 40 50 55)
Stockage : (30 40 45 55)

Immeuble 5

Confort chauffage : (10 14 15 19)
Confort éclairage : (75 100 1000 2000)
Superficie immeuble : (2000 2500 3000 3500)
Densité de personnes : (18.5 19 22 33)
Isolation thermique : (3 3.5 4.5 5)
Optimisation des panneaux solaires : (70 80 90 90)
Nombre de panneaux : (30 40 50 55)
Stockage : (30 40 45 55)

Cas d'étude 5 : données d'entrée

Variables communes à tous les agents

Saison : (11 12 12 13)
Ensoleillement : (55 60 75 80)
Humidité de l'air : (0 0 10 15)

Température extérieure : (5 7 13 18)
Moment de la journée : (12 12.5 13 13.5)
Capacité V2G : (60 75 80 90)
Prix de l'électricité : (90 110 120 180)

Maison 1

Confort chauffage : (9 10.5 11 12)
Confort éclairage : (100 250 280 400)
Superficie immeuble : (112 112 112 112)
Densité de personnes : (21 22.5 23 23.5)
Isolation thermique : (2.8 3.7 4 5.1)
Optimisation des panneaux solaires : (-5 0 0 5)
Nombre de panneaux : (75 80 85 90)
Stockage : (30 45 50 55)

Maison 2

Confort chauffage : (13 15 17 18.5)
Confort éclairage : (100 250 280 400)
Superficie immeuble : (112 112 112 112)
Densité de personnes : (20 20.7 21 22)
Isolation thermique : (2.8 3.7 4 5.1)
Optimisation des panneaux solaires : (-5 0 0 5)
Nombre de panneaux : (75 80 85 90)
Stockage : (30 45 50 55)

Pavillon 1

Confort chauffage : (12.5 13 13.5 14)
Confort éclairage : (20 70 80 100)
Superficie immeuble : (90 90 100 100)
Densité de personnes : (0 0 15 16)
Isolation thermique : (3.5 4 4.5 5)
Optimisation des panneaux solaires : (-5 0 0 5)
Nombre de panneaux : (70 72 75 80)
Stockage : (25 30 35 40)

Pavillon 2

Confort chauffage : (12 12.5 13 14)
Confort éclairage : (20 70 80 100)
Superficie immeuble : (90 90 100 100)
Densité de personnes : (0 0 15 16)
Isolation thermique : (3.5 4 4.5 5)
Optimisation des panneaux solaires : (-5 0 0 5)
Nombre de panneaux : (70 72 75 80)
Stockage : (25 30 35 40)

Villa

Confort chauffage : (13 13.5 14 15)

Confort éclairage : (1000 2000 2500 3000)
Superficie immeuble : (400 600 1000 2500)
Densité de personnes : (45 50 60 70)
Isolation thermique : (6 7 7.5 8)
Optimisation des panneaux solaires : (-5 0 0 5)
Nombre de panneaux : (80 85 92 95)
Stockage : (75 80 85 90)