

# TOASTER : Technologie, Organisation et Adaptation des Systèmes Territoriaux Énergétiques en Réseaux

Rapport final  
02/07/2014

DGALN/Plan Urbanisme Construction  
Architecture

Marché : 12 PUCA 05 / 1502935126 (29/03/2012)



## Table des matières

I. Enjeux, objectifs de la recherche Toaster.....	10
I.1. Les enjeux induits par le déploiement des smart-grids et le développement du BEPOS	10
I.2. Les différentes définitions des smart-grids : un système d'information augmentant le système énergétique.....	14
I.3. Les notions associées aux techniques de gestion dynamique de la demande d'énergie	16
I.3.a. Les systèmes d'usages constitutifs de la demande dans le secteur du logement .....	16
I.3.b. Le système énergétique territorial.....	17
I.3.c. L'échelle de la demande et de la production dans une approche spatialisée (les agrégats spatiaux).....	18
I.3.d. Le foisonnement.....	21
I.3.e. L'effacement des usages .....	22
I.4. Les diverses finalités de la gestion dynamique de la demande .....	23
I.4.a. La notion de gisements appliquée à l'effacement des usages .....	23
I.4.b. Les objectifs de capacité selon les configurations top-down et bottom-up .....	23
I.4.c. Les objectifs de capacité déterminée par la consommation et la production d'énergie : le cas de la production des BEPOS .....	25
I.5. Objectifs de la recherche Toaster .....	27
II. Méthode et modélisation .....	28
II.1. L'architecture du modèle : une approche systémique explicite.....	28
II.1.a. Modèle Toaster.....	28
II.1.b. Mesure de l'efficacité du plan d'effacement .....	28
II.2. Hypothèses de calcul des charges énergétiques à l'échelle urbaine : application à l'agglomération de Tours .....	29
II.2.a. Composition typologique du bâti et reconstitution des systèmes de chauffage .....	29
II.2.b. Reconstitution de la typologie des ménages.....	29
II.3. Hypothèses relatives aux usages spécifiques de l'électricité dans les logements.....	30
II.3.a. Le modèle Charter® .....	30
II.3.b. Les enquêtes sur un échantillon de ménages.....	31
II.3.c. Les simulations dynamiques sur un échantillon de bâtiments .....	31
II.4. Les limites et les avantages de la modélisation .....	31
II.4.a. Date du report de consommation.....	31
II.4.b. Caractérisation des ménages.....	31
II.5. Analyse à l'échelle urbaine.....	32
II.5.a. La structure énergétique du cas d'étude sur la base des données INSEE de 2008 ....	32
III. Les gisements locaux de l'effacement.....	40

III.1.a.	Les gisements d’effacement de l’échelle du bâtiment à l’échelle urbaine.....	40
III.2.	Analyse à l’échelle microscopique des pratiques dans les logements.....	75
III.2.a.	La structure des usages par type de ménage : constitution de l’échantillon.....	75
III.2.b.	Comprendre les usages dans la perspective d’éventuelles demandes d’effacement	80
III.2.c.	La perception de l’effacement.....	84
	IV. Les <i>smart grids</i> comme moyen de pilotage de la décentralisation énergétique ...	93
IV.1.	De l’effacement des usages vers la régulation du trafic énergétique .....	93
IV.2.	Existe-t-il une échelle territoriale optimale qui maximise le gisement d’effacement des usages électriques ? .....	94
IV.3.	Le renversement de raisonnement lié au déploiement des smart-grids et au développement du BEPOS.....	95
IV.4.	Le BEPOS et les smart-grids comme moyen pour territorialiser la question de la transition énergétique : de la maîtrise de la consommation d’énergie vers la capacité de la production locale et du transport.....	96
	V. ANNEXES.....	98
V.1.	Le module toaster système .....	98
V.1.a.	Module t-Geometry .....	98
V.1.b.	Module t-Systems .....	100
V.1.c.	Module t-Solar.....	102
V.1.d.	Module t-Heat .....	104
V.1.e.	Module t-Uses .....	105
V.2.	Le modèle Charter® .....	106
V.2.a.	Liste des usages reconstitués.....	106
V.2.b.	Paramètres clés du calcul.....	107
V.2.c.	Parc d’équipements et puissance moyenne .....	107
V.2.d.	Différenciation des usages.....	109
V.2.e.	Résultats obtenus .....	112
V.3.	Le modèle d’optimisation.....	114
V.3.a.	Principes du module d’optimisation.....	114
V.4.	La méthode de simulation des besoins thermiques à l’échelle du bâtiment .....	116
V.4.a.	Scénarios étudiés.....	117
V.4.b.	Généralités .....	117
V.4.c.	Composition de l’enveloppe .....	118
V.4.d.	Liste des compositions utilisées en Maison Individuelle (MI) .....	118
V.4.e.	Liste des compositions utilisées en Immeuble collectif (IC) .....	121
V.4.f.	Menuiseries et valorisation des apports solaires.....	124
V.4.g.	Surfaces des fenêtres des façades Nord et Sud.....	124

V.4.h.	Ponts thermiques .....	126
V.4.i.	Scénario d'occupation hebdomadaire :.....	127
V.4.j.	Consignes de température hebdomadaire .....	128
V.4.k.	Scénario de renouvellement d'air.....	129
V.4.l.	Scénario de puissance dissipée hebdomadaire (W/m <sup>2</sup> ).....	130
V.4.m.	Scénario d'occultation .....	131
V.4.n.	Visualisation 3D du bâtiment .....	132
V.4.o.	Méthodologie retenue, hypothèses de modélisation .....	134
V.4.p.	Synthèse des résultats .....	134
V.4.q.	Récapitulatif des besoins .....	136
V.4.a.	Prise en compte des masques proches.....	137
V.5.	Bibliographie .....	148

## Table des illustrations

FIGURE 1 : CHAMP GRAVITATIONNEL AUTOUR DE POLES THEORIQUES DE MASSE DISTINCTE .....	19
FIGURE 2 : DECOUPAGE SOUS TOASTER DE L'AGGLOMERATION DE TOURS A PARTIR DES POLES DE DENSITE (COS) .....	20
FIGURE 3 : FOISONNEMENT THEORIQUE EN FONCTION DE LA TAILLE DE L'AGREGAT .....	22
FIGURE 4 : GISEMENT D'EFFACEMENT ET PROFIL DES COURBES DE CAPACITE OBJECTIVE .....	24
FIGURE 5 : OBJECTIFS DE CAPACITES SUR LA BASE DES PRODUCTIONS LISSEE D'ENERGIE JOURNALIERES, HEBDOMADAIRES ET MENSUELLES A L'ECHELLE NATIONALE POUR UNE PERIODE DE 2 MOIS (A PARTIR DES DONNEES RTE POUR LES DEUX PREMIERS MOIS DE L'ANNEE 2008). .....	26
FIGURE 6 : CARTE DE LA ZONE D'ETUDE DU PROJET TOASTER .....	32
FIGURE 7 : ZOOM SUR LES BATIMENTS ETUDIES .....	33
FIGURE 8 : REPARTITION DES BATIMENTS PAR PERIODE DE CONSTRUCTION .....	33
FIGURE 9 : REPARTITION PAR PERIODE DE CONSTRUCTION (COMPARAISON FRANCE METROPOLITAINE) .....	34
FIGURE 10 : REPARTITION DES BATIMENTS PAR ENERGIE DE CHAUFFAGE .....	34
FIGURE 11 : REPARTITION PAR SOURCE D'ENERGIE POUR LE CHAUFFAGE (COMPARAISON FRANCE METROPOLITAINE) .....	35
FIGURE 12 : REPARTITION PAR TYPE DE MENAGE (COMPARAISON FRANCE METROPOLITAINE) .....	36
FIGURE 13 : COURBE DE CHARGE POUR LES 48 PREMIERES HEURES DE L'ANNEE .....	38
FIGURE 14 : COURBE DE CHARGE ANNUELLE DU TERRITOIRE CONSIDERE DANS TOASTER .....	38
FIGURE 15 : CONSTRUCTION DE LA COURBE « TUNNEL » (1/3) .....	41
FIGURE 16 : CONSTRUCTION DE LA COURBE « TUNNEL » (2/3) .....	42
FIGURE 17 : CONSTRUCTION DE LA COURBE « TUNNEL » (3/3) .....	42
FIGURE 18 : COURBE DE CHARGE ET COURBE « TUNNEL » POUR LES 200 PREMIERES HEURES DE L'ANNEE .....	43
FIGURE 19 : COURBE DE CHARGE ET COURBE « TUNNEL » POUR 200 HEURES EN MILIEU D'ANNEE .....	44
FIGURE 20 : FONCTIONNEMENT DU PROGRAMME D'EFFACEMENT .....	44
FIGURE 21 : COURBE DE CHARGE APRES MODULATION POUR LES 200 PREMIERES HEURES DE L'ANNEE .....	45
FIGURE 22 : COURBE DE CHARGE APRES MODULATION POUR 200 HEURES EN MILIEU D'ANNEE .....	45
FIGURE 23 : POURCENTAGE DE REDUCTION DE LA CONSOMMATION AUX HEURES DE POINTES IDENTIFIEES (13H-14H ET DE 20H A 23H) .....	46
FIGURE 24 : VALEURS DE L'INDICATEUR D'EFFICACITE SELON LE PARAMETRE DE LA COURBE TUNNEL .....	47
FIGURE 25 : PRODUCTION SOLAIRE ANNUELLE DE LA ZONE D'ETUDE .....	49
FIGURE 26 : PRODUCTION SOLAIRE DE LA ZONE D'ETUDE SUR 2 JOURS D'ETE .....	50
FIGURE 27 : COURBES DE CHARGES AVANT ET APRES MODULATION SUR 4 JOURS D'HIVER .....	50
FIGURE 28 : PART DE LA PRODUCTION LOCALE D'ELECTRICITE CONSOMMEE AVANT MODULATION (3 AGREGATS) .....	53
FIGURE 29 : AUGMENTATION DE LA PART DE LA PRODUCTION LOCALE D'ELECTRICITE CONSOMMEE APRES MODULATION (3 AGREGATS) .....	53
FIGURE 30 : PART DE LA PRODUCTION LOCALE D'ELECTRICITE CONSOMMEE AVANT MODULATION (12 AGREGATS) .....	54
FIGURE 31 : AUGMENTATION DE LA PART DE LA PRODUCTION LOCALE D'ELECTRICITE CONSOMMEE APRES MODULATION (12 AGREGATS) .....	55
FIGURE 32 : PART DE LA PRODUCTION LOCALE D'ELECTRICITE CONSOMMEE AVANT MODULATION (234 AGREGATS) .....	56
FIGURE 33 : AUGMENTATION DE LA PART DE LA PRODUCTION LOCALE D'ELECTRICITE CONSOMMEE APRES MODULATION (234 AGREGATS) .....	56
FIGURE 34 : PRODUCTION EOLIENNE ANNUELLE DE LA ZONE D'ETUDE .....	58
FIGURE 35 : PRODUCTION SOLAIRE DE LA ZONE D'ETUDE SUR 2 JOURS D'ETE .....	59
FIGURE 36 : COURBES DE CHARGES AVANT ET APRES MODULATION .....	60
FIGURE 37 : PART DE LA PRODUCTION LOCALE D'ELECTRICITE CONSOMMEE AVANT MODULATION (3 AGREGATS) .....	62
FIGURE 38 : AUGMENTATION DE LA PART DE LA PRODUCTION LOCALE D'ELECTRICITE CONSOMMEE APRES MODULATION (3 AGREGATS) .....	62
FIGURE 39 : PART DE LA PRODUCTION LOCALE D'ELECTRICITE CONSOMMEE AVANT MODULATION (12 AGREGATS) .....	63
FIGURE 40 : AUGMENTATION DE LA PART DE LA PRODUCTION LOCALE D'ELECTRICITE CONSOMMEE APRES MODULATION (12 AGREGATS) .....	64

FIGURE 41 : PART DE LA PRODUCTION LOCALE D'ELECTRICITE CONSOMMEE AVANT MODULATION (234 AGREGATS) .....	64
FIGURE 42 : AUGMENTATION DE LA PART DE LA PRODUCTION LOCALE D'ELECTRICITE CONSOMMEE APRES MODULATION (234 AGREGATS) .....	65
FIGURE 43 : PRODUCTION SOLAIRE ET EOLIENNE ANNUELLE DE LA ZONE D'ETUDE .....	66
FIGURE 44 : PRODUCTION SOLAIRE ET EOLIENNE SUR 35 HEURES CONSECUTIVES DE LA ZONE D'ETUDE .....	67
FIGURE 45 : COURBES DE CHARGES AVANT ET APRES MODULATION SUR 4 JOURS D'HIVER .....	67
FIGURE 46 : PART DE LA PRODUCTION LOCALE D'ELECTRICITE CONSOMMEE AVANT MODULATION (3 AGREGATS) .....	69
FIGURE 47 : AUGMENTATION DE LA PART DE LA PRODUCTION LOCALE D'ELECTRICITE CONSOMMEE APRES MODULATION (3 AGREGATS) .....	69
FIGURE 48 : PART DE LA PRODUCTION LOCALE D'ELECTRICITE CONSOMMEE AVANT MODULATION (12 AGREGATS) .....	70
FIGURE 49 : AUGMENTATION DE LA PART DE LA PRODUCTION LOCALE D'ELECTRICITE CONSOMMEE APRES MODULATION (12 AGREGATS) .....	71
FIGURE 50 : PART DE LA PRODUCTION LOCALE D'ELECTRICITE CONSOMMEE AVANT MODULATION (234 AGREGATS) .....	71
FIGURE 51 : AUGMENTATION DE LA PART DE LA PRODUCTION LOCALE D'ELECTRICITE CONSOMMEE APRES MODULATION (234 AGREGATS) .....	72
FIGURE 52 : PART DE LA PRODUCTION LOCALE D'ELECTRICITE CONSOMMEE APRES MODULATION SELON LES DECOUPAGES TERRITORIAUX .....	73
FIGURE 53 : CONSTRUCTION DE LA GEOMETRIE DES ILOTS A PARTIR DE T-GEOMETRY .....	99
FIGURE 54 : MAILLAGE A PARTIR DE TOASTER – GEOMETRY .....	100
FIGURE 55 : ARCHITECTURE DU MODULE T-HEAT CONSTRUITE SUR T-SYSTEMS .....	101
FIGURE 56 : PLATEFORME DE MODELISATION EN SYSTEME ET D'IMPLEMENTATION, TOASTER-SYSTEM .....	102
FIGURE 57 : ANGLE SOLIDE DE CIEL VISIBLE CALCULE POUR CHAQUE MAILLE POUR EXEMPLE D'ILOT URBAIN .....	102
FIGURE 58 : GEOMETRIE SOLAIRE DU MODULE T-SOLAR .....	103
FIGURE 59 : RAYONNEMENT SUR L'ESPACE URBAIN CALCULE PAR T-SOLAR .....	103
FIGURE 60 : INTERFACE DU MODULE T-HEAT .....	104
FIGURE 61 : COURBE DE PROBABILITE DE DISPARITION D'UN EQUIPEMENT .....	108
FIGURE 62 : STRUCTURE DU PARC D'APPAREILS DE FROID .....	108
FIGURE 63 : CONSOMMATIONS ELECTRIQUES LIEES A L'USAGE « REFRIGERATEUR » D'UN MENAGE EN FONCTION DE SON NOMBRE DE PERSONNES .....	111
FIGURE 64 : CONSOMMATIONS ELECTRIQUES LIEES A L'USAGE « REFRIGERATEUR » D'UN MENAGE EN FONCTION DE LA TRANCHE D'AGE DU REFERENT .....	112
FIGURE 65 : CONSOMMATIONS TOTALES D'ELECTRICITE SPECIFIQUE D'UN MENAGE EN FONCTION DE SON NOMBRE DE PERSONNES .....	113
FIGURE 66 : SCENARIO D'OCCUPATION EN MAISON INDIVIDUELLE EXPRIME EN POURCENTAGE DU NOMBRE DE PERSONNES (4 PERSONNES) .....	127
FIGURE 67 : SCENARIO D'OCCUPATION DU COMMERCE EXPRIME EN POURCENTAGE DU NOMBRE DE PERSONNES (4 PERSONNES) .....	128
FIGURE 68 : SCENARIO DE CONSIGNE DE TEMPERATURE CONSTANTE 20°C .....	128
FIGURE 69 : SCENARIO DE CONSIGNE DE TEMPERATURE COMMERCE .....	129
FIGURE 70 : SCENARIO DE PUISSANCE DISSIPEE POUR LA MAISON INDIVIDUELLE .....	130
FIGURE 71 : SCENARIO DE PUISSANCE DISSIPEE POUR LE COMMERCE DE L'IMMEUBLE COLLECTIF .....	131
FIGURE 72 : SCENARIO D'OCCULTATION ESTIVAL .....	131
FIGURE 73 : SCENARIO D'OCCULTATION HIVERNAL .....	131
FIGURE 74 : SCENARIO D'OCCULTATION ANNUEL DECOMPOSE EN DEUX SCENARIOS HIVERNAL ET ESTIVAL .....	132
FIGURE 75 : VUE DE LA FAÇADE NORD 1950 .....	132
FIGURE 76 : VUE DE LA FAÇADE SUD 1950 .....	132
FIGURE 77 : VUE DE LA FAÇADE NORD 1974 .....	133
FIGURE 78 : VUE DE LA FAÇADE SUD 1974 .....	133
FIGURE 79 : VUE DE LA FAÇADE NORD BBC .....	133
FIGURE 80 : VUE DE LA FAÇADE SUD BBC .....	133
FIGURE 81 : VUE DE LA FAÇADE NORD .....	133
FIGURE 82 : VUE DE LA FAÇADE SUD .....	133
FIGURE 83 : VUE DE LA CONFIGURATION MASQUE POUR LA MAISON INDIVIDUELLE .....	137

FIGURE 84 : VUE DE LA CONFIGURATION MASQUE POUR L'IMMEUBLE COLLECTIF .....	138
FIGURE 85 : EVOLUTION DES BESOINS 1950 POUR LA MAISON EN SITE ISOLE .....	139
FIGURE 86 : EVOLUTION DES BESOINS 1950 POUR LA MAISON AVEC MASQUES .....	140
FIGURE 87 : EVOLUTION DES BESOINS 1974 POUR LA MAISON EN SITE ISOLE .....	140
FIGURE 88 : EVOLUTION DES BESOINS 1974 POUR LA MAISON AVEC MASQUES .....	141
FIGURE 89 : EVOLUTION DES BESOINS BBC POUR LA MAISON EN SITE ISOLE.....	141
FIGURE 90 : EVOLUTION DES BESOINS BBC POUR LA MAISON AVEC MASQUES.....	142
FIGURE 91 : EVOLUTION DES BESOINS 1950 POUR L'IMMEUBLE COLLECTIF EN SITE ISOLE .....	143
FIGURE 92 : ORIENTATION DANS LE SENS HORAIRE DE 0° A 180 ° .....	143
FIGURE 93 : EVOLUTION DES BESOINS 1950 POUR L'IMMEUBLE COLLECTIF AVEC MASQUES .....	144
FIGURE 94 : EVOLUTION DES BESOINS 1974 POUR L'IMMEUBLE COLLECTIF EN SITE ISOLE .....	144
FIGURE 95 : EVOLUTION DES BESOINS 1974 POUR L'IMMEUBLE COLLECTIF AVEC MASQUES .....	145
FIGURE 96 : EVOLUTION DES BESOINS BBC POUR L'IMMEUBLE COLLECTIF EN SITE ISOLE.....	145
FIGURE 97 : EVOLUTION DES BESOINS BBC POUR L'IMMEUBLE COLLECTIF AVEC MASQUES.....	146
FIGURE 98 : COMPARAISONS DES BESOINS BBC AVEC ET SANS MASQUES POUR L'IMMEUBLE COLLECTIF .....	146

## Liste des tableaux

TABLEAU 1 : NOMBRE DE BATIMENTS PAR PERIODE DE CONSTRUCTION .....	34
TABLEAU 2 : NOMBRE DE BATIMENTS PAR ENERGIE PRINCIPALE DE CHAUFFAGE.....	35
TABLEAU 3 : NOMBRE DE MENAGES PAR PROFIL.....	36
TABLEAU 4 : LISTE DES USAGES MODELISES AU SEIN DE L'OUTIL CHARTER® .....	37
TABLEAU 5 : LISTE DES SCENARII TESTES .....	40
TABLEAU 6 : VALEURS DE L'INDICATEUR D'EFFICACITE SELON LE PARAMETRE DE LA COURBE TUNNEL .....	47
TABLEAU 7 : RESULTATS DE L'EFFACEMENT SUR LA ZONE D'ETUDE.....	51
TABLEAU 8 : RESULTATS DE L'EFFACEMENT SUR LE DECOUPAGE EN 3 ZONES.....	52
TABLEAU 9 : RESULTATS DE L'EFFACEMENT SUR LA ZONE D'ETUDE.....	61
TABLEAU 10 : RESULTATS DE L'EFFACEMENT SUR LE DECOUPAGE EN 3 ZONES.....	61
TABLEAU 11 : RESULTATS DE L'EFFACEMENT SUR LA ZONE COMPLETE .....	68
TABLEAU 12 : RESULTATS DE L'EFFACEMENT SUR LE DECOUPAGE EN 3 AGREGATS .....	68
TABLEAU 13 : RESULTATS COMPARES DES SCENARII 2, 3 ET 4 .....	72
TABLEAU 14 : MINIMA ET MAXIMA DE CONSOMMATION LOCALE DE LA PRODUCTION.....	73
TABLEAU 15 : CONSTITUTION DE L'ECHANTILLON .....	77
TABLEAU 16 : INVENTAIRE « TECHNIQUE » DES APPAREILS ELECTRIQUES PRESENTS DANS LE FOYER, .....	78
TABLEAU 17 : PLANNING JOURNALIER (SUR UNE DUREE D'UNE SEMAINE, INTEGRANT LE WEEK-END) DES PRATIQUES ET DES UTILISATIONS DES EQUIPEMENTS ELECTRIQUES ET ELECTROMENAGERS (AVEC ENCHAINEMENTS & COMBINAISONS), CECI POUR L'ENSEMBLE DES MEMBRES DE L'UNITE FAMILIALE ....	79
TABLEAU 18 : LISTE DES USAGES MODELISES AU SEIN DE L'OUTIL CHARTER® .....	106
TABLEAU 19 : LISTE DES CRITERES DE DIFFERENCIATION UTILISES POUR LES DETERMINANTS DE CONSOMMATIONS DE CHAQUE USAGE MODELISE AU SEIN DE CHARTER® .....	110
TABLEAU 20 : EXTRAIT DE TABLE D'ENTREE DE L'OUTIL CHARTER® POUR L'USAGE REFRIGERATEUR.....	111
TABLEAU 21 : TROIS PERIODES DE CONSTRUCTION ETUDIEES : 1950, 1974 ET BBC.....	117
TABLEAU 22 : GENERALITES ET HYPOTHESES DE L'ETUDE.....	117
TABLEAU 23 : LIBELLES ET UNITES DES GRANDEURS UTILISEES DANS PLEIADES-COMFIE .....	118
TABLEAU 24 : COMPOSITION DU PLANCHER HAUT 1950 (COMBLES PERDUS) .....	118
TABLEAU 25 : COMPOSITION DES RAMPANTS 1950.....	118
TABLEAU 26 : COMPOSITION DU PLANCHER SUR TERRE-PLEIN 1950 .....	118
TABLEAU 27 : COMPOSITION DES MURS EXTERIEURS 1950.....	119
TABLEAU 28 : COMPOSITION DES RAMPANTS 1974.....	119
TABLEAU 29 : COMPOSITION DU PLANCHER HAUT 1974 (COMBLES PERDUS) .....	119
TABLEAU 30 : COMPOSITION DU PLANCHER SUR TERRE-PLEIN 1974 .....	119
TABLEAU 31 : COMPOSITION DES MURS EXTERIEURS 1974.....	119
TABLEAU 32 : COMPOSITION DU PLANCHER HAUT BBC (COMBLES PERDUS).....	120
TABLEAU 33 : COMPOSITION DES RAMPANTS BBC .....	120
TABLEAU 34 : COMPOSITION DU PLANCHER BAS SUR TERRE-PLEIN BBC.....	120
TABLEAU 35 : COMPOSITION DES MURS EXTERIEURS BBC .....	120
TABLEAU 36 : COMPOSITION DE LA TOITURE-TERRASSE 1950.....	121
TABLEAU 37 : COMPOSITION DU PLANCHER BAS SUR VIDE SANITAIRE 1950 .....	121
TABLEAU 38 : COMPOSITION DU PLANCHER INTERMEDIAIRE 1950 .....	121
TABLEAU 39 : COMPOSITION DES MURS EXTERIEURS 1950.....	121
TABLEAU 40 : COMPOSITION DU PLANCHER INTERMEDIAIRE 1974 .....	122
TABLEAU 41 : COMPOSITION DE LA TOITURE-TERRASSE 1974.....	122
TABLEAU 42 : COMPOSITION DU PLANCHER BAS SUR VIDE SANITAIRE 1974 .....	122
TABLEAU 43 : COMPOSITION DES MURS EXTERIEURS 1974.....	122
TABLEAU 44 : COMPOSITION DE LA TOITURE-TERRASSE BBC .....	123
TABLEAU 45 : COMPOSITION DU PLANCHER INTERMEDIAIRE BBC.....	123
TABLEAU 46 : COMPOSITION DU PLANCHER BAS SUR VIDE SANITAIRE BBC.....	123
TABLEAU 47 : COMPOSITION DES MURS EXTERIEURS BBC .....	123
TABLEAU 48 : COEFFICIENTS DE TRANSMISSION THERMIQUE DES PORTES DE 1950/1974/BBC.....	124
TABLEAU 49 : COEFFICIENTS DE TRANSMISSION THERMIQUE DES FENETRES ET FACTEUR SOLAIRE DE 1950/1974/BBC.....	124
TABLEAU 50 : COEFFICIENTS D'ALBEDOS.....	124
TABLEAU 51 : ETATS DE SURFACE (EMISSIVITES ET ABSORPTIVITES) .....	124

TABLEAU 52 : SURFACES DES FENETRES PAR RAPPORT AUX SURFACES DE PLANCHER ET DE FAÇADE 1950 ....	125
TABLEAU 53 : SURFACES DES FENETRES PAR RAPPORT AUX SURFACES DE PLANCHER ET DE FAÇADE 1974 ....	125
TABLEAU 54 : SURFACES DES FENETRES PAR RAPPORT AUX SURFACES DE PLANCHER ET DE FAÇADE BBC.....	125
TABLEAU 55 : SURFACES DES FENETRES PAR RAPPORT AUX SURFACE DE PLANCHER ET DE FAÇADE 1950/1974/BBC.....	126
TABLEAU 56 : PONTS THERMIQUES 1974 .....	126
TABLEAU 57 : PONTS THERMIQUES BBC.....	126
TABLEAU 58 : PONTS THERMIQUES 1974 .....	127
TABLEAU 59 : PONTS THERMIQUES BBC.....	127
TABLEAU 60 : HYPOTHESES DE DEBIT DE VENTILATION POUR LA MAISON INDIVIDUELLE. ....	129
TABLEAU 61 : HYPOTHESES DE DEBIT DE VENTILATION POUR LE COMMERCE DE L'IMMEUBLE COLLECTIF ....	130
TABLEAU 62 : BESOINS ET PUISSANCES EN CHAUFFAGE ET CLIMATISATION 1950.....	134
TABLEAU 63 : TEMPERATURES MINIMALES, MOYENNES ET MAXIMALES DE L'ANNEE SIMULEE .....	134
TABLEAU 64 : BESOINS ET PUISSANCES EN CHAUFFAGE ET CLIMATISATION 1974.....	134
TABLEAU 65 : TEMPERATURES MINIMALES, MOYENNES ET MAXIMALES DE L'ANNEE SIMULEE .....	134
TABLEAU 66 : BESOINS ET PUISSANCES EN CHAUFFAGE ET CLIMATISATION BBC .....	135
TABLEAU 67 : TEMPERATURES MINIMALES, MOYENNES ET MAXIMALES DE L'ANNEE SIMULEE .....	135
TABLEAU 68 : BESOINS ET PUISSANCES EN CHAUFFAGE ET CLIMATISATION 1950.....	135
TABLEAU 69 : TEMPERATURES MINIMALES, MOYENNES ET MAXIMALES DE L'ANNEE SIMULEE .....	135
TABLEAU 70 : BESOINS ET PUISSANCES EN CHAUFFAGE ET CLIMATISATION 1974.....	136
TABLEAU 71 : TEMPERATURES MINIMALES, MOYENNES ET MAXIMALES DE L'ANNEE SIMULEE .....	136
TABLEAU 72 : BESOINS ET PUISSANCES EN CHAUFFAGE ET CLIMATISATION BBC .....	136
TABLEAU 73 : TEMPERATURES MINIMALES, MOYENNES ET MAXIMALES DE L'ANNEE SIMULEE .....	136
TABLEAU 74 : RECAPITULATIF DES BESOINS MAISON INDIVIDUELLE .....	136
TABLEAU 75 : RECAPITULATIF DES BESOINS IMMEUBLE COLLECTIF .....	136
TABLEAU 76 : COMPARAISON DES CHALEURS METABOLIQUE.....	147
TABLEAU 77 : COMPARAISON DES BESOINS 1 OU 4 OCCUPANTS EN SITE ISOLE .....	147
TABLEAU 78 : COMPARAISON DES BESOINS 1 OU 4 OCCUPANTS EN SITE AVEC MASQUES .....	147

# I. Enjeux, objectifs de la recherche Toaster

Cette partie présente les enjeux et les notions théoriques indispensables pour appréhender la question du contrôle dynamique de la demande d'énergie. Il démontre que les solutions smart grids ou BEPOS dépendent plus des objectifs de capacité de production et de transport de l'énergie que des dispositifs matériels en jeu. Cette partie a également pour objet de montrer combien ces nouveaux dispositifs techniques reposent la question de la configuration des échanges énergétiques entre territoires en proposant des définitions formalisées de l'échelle des échanges et du gisement de la modulation des charges énergétiques.

## I.1. Les enjeux induits par le déploiement des smart-grids et le développement du BEPOS

---

Les questions soulevées par le développement du BEPOS comme de celui des smart grids, d'abord considérées comme indépendantes entre elles et de nature strictement techniques, relèvent aussi d'enjeux socioéconomiques et surtout, comme on le verra plus bas, d'enjeux territoriaux. Ces dimensions, souvent absentes d'un discours technologiste relativement autonome, sont fondamentales car elles déterminent simultanément les potentiels et les limites de ces deux solutions techniques en réalité fortement connectées : d'une part, du point de vue des territoires, le BEPOS et les smart grids pourront s'inscrire dans l'éventail des moyens d'action dédiés à la maîtrise de l'énergie à l'échelle locale pour peu que les acteurs des politiques urbaines s'en emparent (alors que ces nouveaux moyens paraissent actuellement être portés quasi exclusivement par des acteurs « délocalisés » à l'image de ceux de la production, du transport de l'énergie et du bâtiment) ; d'autre part, sous l'angle socioéconomique, les gisements que devraient dévoiler ces technologies seront fortement dépendants des modes d'optimisations qui seront adoptés à terme et de la réaction des usagers potentiellement concernés.

La nouvelle complexité que devraient apporter ces deux techniques a été traitée dans une certaine mesure lors des séminaires organisés par le PUCA. Elle pose sous un nouvel éclairage la question de leur définition, non pas en termes de dispositifs matériels (largement présentés par les protagonistes de « l'intelligence » des bâtiments ou des réseaux énergétiques) mais en termes de modèle d'optimisation et de ce que les mathématiques appellent fonction objective : en clair, quelle « intelligence » sera déployée et à quelle « fin » ?

Or il ne fait aucun doute que la définition du couple BEPOS-smart grid dépend de ce que l'on tentera d'infléchir d'un point de vue énergétique : cherchera-t-on à réduire au mieux le bilan annuel ? Le bilan horo-saisonnier ? Celui des bâtiments pris comme des entités autonomes ? Celui du quartier ou du territoire ? Cherchera-t-on à réduire les pics engendrés par certains foisonnements à l'échelle nationale ?

Toutes ces questions, mises en exergue par les séminaires et l'appel à proposition lancé par le PUCA en 2012 et auquel répond cette recherche, apporteront des réponses différenciées selon que l'on se positionnera en opérateur de l'énergie

(production et transport), en prestataire de services liés au bâtiment (gestionnaire) ou en acteur de politiques urbaines locales (collectivité territoriale).

La polysémie de ces techniques mise en lumière lors des débats organisés par le PUCA relève ainsi de la polymorphie des modèles d'optimisation et des finalités que ces derniers tenteront d'atteindre, et, insistons sur ce point, nullement des dispositifs matériels proprement dit. De ce point de vue, le BEPOS est avant tout un bâtiment pour lequel trois dispositifs emboîtés se côtoient : un premier, concernant le couple consommation-production de l'énergie, est supposé être optimisé sur une base théorique lors de la conception ; un second, informationnel, est chargé de renseigner en temps réel l'état du premier dispositif pendant la vie du bâtiment ; enfin, un dernier, constitué de commandes, agit sur le couple consommation-production à partir des informations fournies par le système informationnel et ce, dans le but de garantir un bilan énergétique positif dans la durée. Les deux derniers dispositifs, informationnel et de commandes, sont généralement englobés dans la notion de « gestion technique du bâtiment » (GTB).

Les smart grids peuvent quant à eux être considérés comme l'extension de la notion de GTB<sup>1</sup> à des ensembles de plus grandes tailles (quartier, territoire, etc.) et, par conséquent, comme sa généralisation à des niveaux scalaires supérieurs, à la différence près que ces ensembles n'ont pas fait ou ne peuvent faire, par définition, l'objet d'aucune optimisation théorique en amont (nulle conception similaire à celle d'un bâtiment pour une ville ou un territoire). Les smart grids peuvent être ainsi baptisés GTU (gestion technique urbaine) à l'échelle urbaine ou GTT (gestion technique territoriale<sup>2</sup>) à l'échelle territoriale, etc.

Deux générations de smart grids devraient se succéder à plus ou moins long terme : la première, actuellement en cours de déploiement en France, strictement informationnelle, devrait permettre d'ajuster la production et le grand transport selon des contraintes imposées par les capacités des infrastructures et les stratégies du marché de l'énergie ; la seconde, qui ne manquera pas de se développer assez rapidement, devrait doter les smart grids de première génération d'un système de commandes, commandes pouvant être actionnées grâce à des signaux électriques ou informationnels afin de prendre le contrôle des postes de consommations et de production, et/ou grâce à des signaux tarifaires vers les usagers finaux les invitant à différer ou effacer<sup>3</sup> une part de leur consommation.

La distinction entre les divers dispositifs dont nous venons de montrer rapidement la relative homogénéité en termes d'offre technique se fera surtout autour des « boîtes noires » qui soutiendront le fonctionnement des GTB, des GTU, jusqu'aux GTT, et les finalités énergétiques que ces boîtes chercheront à atteindre. Plutôt

---

<sup>1</sup> Selon que l'on partage la définition de David J. Leeds et du *Greentech Media's GTM Research* faisant désormais référence dans le domaine (Leeds D. J., *The smart grids in 2010: market segments, applications and industry players*, *Greentech Media's GTM Research*, 2009, 145 p.).

<sup>2</sup> La GTT rejoint en ce sens la notion d'urbistique, terme créé en 1986 par le Centre de compétence en urbistique (CREM), dont la mission est de coupler l'urbain à la systémique et au NITC (technologies de l'information et de la communication).

<sup>3</sup> On définira dans ces pages l'effacement comme le retrait complet ou provisoire d'une charge énergétique, plutôt électrique, en totalité ou partiellement.

développées par des acteurs de l'informatique<sup>4</sup>, elles auront autant de formes que de commanditaires et il n'est pas certain que ces dernières convergent, autrement dit, que les finalités énergétiques des divers commanditaires correspondent, si l'on se place du point de vue des destinataires, à celles des usagers finaux ou des collectivités urbaines (mais il n'est pas non plus dit qu'elles s'opposent entre elles totalement).

Du strict point de vue de l'urbain, ces considérations appellent au moins trois enjeux spécifiques :

- La maîtrise de l'énergie à diverses échelles, à partir du BEPOS, du « TBC » (Territoire Basse Consommation) en passant par le « TEPOS » (Territoire à Energie Positive) couplée à des GTB, GTU ou GTT, implique un changement structurel des systèmes énergétiques territoriaux : le contrôle de la consommation et de la production d'énergie à l'échelle locale induit une double transition énergétique ; d'une part elle modifie les modes de consommations à travers des dispositifs d'effacement de certains usages de l'électricité, d'autre part, elle fait glisser notre modèle de production vers un modèle décentralisé dont le rôle devient de fait prépondérant ;
- Sachant que les technologies de l'information (ou systèmes supposés intelligents) appliquées aux systèmes énergétiques ont des finalités polymorphes, elles peuvent soit accentuer la centralisation en favorisant le lien entre opérateurs et consommateurs (forme top-down rationalisant, dans l'ordre, la gestion de la production centralisée, celle du transport, celle de la distribution et enfin celle de la consommation finale), soit promouvoir les liaisons entre acteurs locaux (forme horizontale et bottom-up favorisant l'épuisement des ressources locales, surtout fatales, et maîtrisant les consommations à des échelles emboîtées). Les intelligences construites autour de ces deux formes sont, en toute hypothèse, quelque peu divergentes.
- Sachant enfin que le modèle qui paraît aujourd'hui se mettre en place favorise la première option, il est utile de se demander comment pourra se développer la seconde.

Le modèle énergétique que la France a choisi d'établir et de poursuivre depuis l'Après-guerre respecte un modèle relativement centralisé connectant, grâce à un imposant réseau de transport et de distribution, une infrastructure de production de forte capacité à des consommateurs terminaux considérés comme isolés (d'un point de vue topologique). La distance scalaire entre la production et la consommation a, dans une certaine mesure, autonomiser les entités composants le système électrique français : les stratégies de production et de transport étant relativement indépendantes de celles de la consommation ou, au mieux, regardant cette dernière comme une entité homogène difficile à maîtriser. Même élargie à l'échelle européenne (grâce à l'interconnexion continue des bouquets de production avec les pays voisins), ce choix et l'accompagnement de la croissance continue des besoins d'électricité ont rencontré un plafond tant en termes de capacité de production que de transport. A titre d'exemple, RTE prévoyait en 2013 une forte demande d'effacement ou de supplément de capacité, malgré la légère baisse des

---

<sup>4</sup> La filière électrique ainsi que la filière Blanc sont également très impliquées pour ne pas dire plus avancées : développement techniques, offres et accompagnement,...

consommations électriques imputées à la diminution de l'activité industrielle de ces dernières années, en mettant en cause la saturation des installations actuelles (accentuée par le déclassement de nombreuses centrales thermiques attendues en 2015), au point de considérer un risque de disparition des marges de sureté d'approvisionnement en 2017<sup>5</sup>.

Dans ce lien top-down entre la production « délocalisée » et la consommation terminale, les smart grids de première génération doivent ainsi optimiser un peu plus un système macroscopique de l'offre tendant à la saturation en jouant sur la structure dynamique de la demande, tout en visant une exploitation aux limites matérielles des infrastructures de production et de transport. La rationalité top-down que les smart grids doivent satisfaire est donc tributaire de stratégies relatives au grand marché de l'énergie à l'échelle nationale comme européenne. Dans cette configuration, toute production individualisée de l'énergie, incluse celle des BEPOS, peut être considérée, au pire, comme une perturbation du système macroscopique, ou, au mieux, comme une contribution à la marge envers la production délocalisée<sup>6</sup>. Dans ce contexte, le BEPOS devrait s'efforcer d'atteindre une autonomie énergétique exclusivement comptable (sans exigence d'autoconsommation), la production d'énergie annuelle totalement réinjectée dans le système macroscopique devant être uniquement supérieure ou égale au besoin annuel satisfait par ce même système.

En s'emparant des questions énergétiques à l'échelle locale, les collectivités territoriales modifient quelque peu cette donne. Ces dernières, en développant des bilans comptables relatifs à l'énergie et aux émissions de CO<sub>2</sub> de leur territoire, peuvent désormais « relocaliser » la question de la production de l'électricité et, pour certaines d'entre elles, celle du transport (nous pensons ici aux Régions situées sur les isthmes du réseau du grand transport, notamment la Bretagne et la région PACA ou à celles au caractère insulaire, notamment à la Réunion). En prônant une plus grande proximité scalaire avec la production, il devient alors envisageable d'atteindre soit une autonomie énergétique comptable identique à celle de la configuration top-down, soit une autonomie « réelle » en jouant, localement, sur le niveau de mutualisation de la production, sur le niveau de foisonnement de la demande et sur la capacité de stockage. L'autonomie énergétique est dans le second cas atteinte par un processus bottom-up, de l'échelle du bâtiment à l'échelle territoriale, en passant par le quartier, la ville, etc. Les smart grids jouent alors le rôle d'une GTB à l'échelle du bâtiment, d'une GTU à l'échelle urbaine, etc. Cette démarche multi-scalaire a l'avantage de découpler la question de la production et de la consommation d'énergie en jouant sur des leviers semblables à ceux de la configuration centralisée à la différence qu'elle multiplie les potentiels de maîtrise apportés par l'empilement des échelles. Dans ce contexte, le BEPOS devient un bâtiment réputé intelligent qui recherche, dans la limite du possible, une autonomie réelle et qui, s'il ne l'atteint pas, appelle à un complément à l'échelle la plus proche (voisin, quartier, ville, etc.). A l'inverse, en situation de surproduction, le BEPOS contribue à la demande ponctuelle de l'agrégat le plus proche d'un point de vue scalaire. Le smart grid devient ainsi le système informationnel et le support

---

<sup>5</sup> RTE, Bilan prévisionnel de l'équilibre offre demande (Actualisation 2013),

<sup>6</sup> Pour preuve, la Commission de régulation de l'énergie (CRE) ne mesure pas la production des installations de puissance nominale inférieure à 20 MW.

d'échanges énergétiques horizontaux puis ascendants jusqu'au système centralisé, système faisant figure d'appoint ultime, et ce, dans le but d'atteindre la plus grande autonomie de l'agrégat territorial considéré.

## **I.2. Les différentes définitions des smart-grids : un système d'information augmentant le système énergétique**

---

La diversité des configurations, ici réduites à l'opposition entre approche top-down et approche bottom-up, se matérialise néanmoins par une forte uniformité des dispositifs techniques. Selon Leeds (2009), les smart grids se définissent d'abord par l'agencement de composantes matérielles spécifiques. Trois couches principales justifient selon lui une telle appellation : une couche physique de transport et de production de l'énergie, une strate de transport de l'information et, enfin, un ensemble d'applications et de services. Selon cette définition, tous les systèmes de contrôle et de commande incarnent de fait des smart grids. C'est la raison pour laquelle, Hamilton (2010) insiste sur deux éléments complémentaires : d'une part, l'implication des usagers, d'autre part, l'intégration dans le système de production des énergies renouvelables principalement photovoltaïque et éolien. D'autres auteurs ajoutent à cette panoplie, le véhicule électrique et les systèmes de stockage de l'énergie.

D'un strict point de vue technique, les smart grids se définiraient selon les protagonistes par :

- Des compteurs intelligents (AMI, Advanced metering infrastructure) ;
- Un service de réponse à la demande (notamment pendant les pointes) ;
- Un mode actif d'optimisation, de fiabilisation et de protection du réseau ;
- Une production décentralisée de l'énergie couplée au mix traditionnel de production ;
- Un système de stockage ;
- Une connexion des véhicules hybrides et électriques ;
- Des systèmes informatiques : les systèmes avancés de contrôle des services énergétiques (energy management systems, EMS), systèmes de gestion de la distribution (distribution management systems, DMS), la gestion des données des compteurs (meter data management, MDM) et les systèmes d'information géographique (SIG) ;
- Des bâtiments intelligents que l'on peut assimiler ici au BEPOS.

Selon Désaunay (2013), les smart grids serait donc un « réseau électrique (qui) aurait la capacité d'optimiser production et consommation d'électricité en exploitant des données prospectives de court et de long terme, et des flux bidirectionnels d'informations et d'électricité entre sources et consommateurs collectifs et individuels ».

Selon nous, ce ne sont pas uniquement ces dispositifs matériels ou informatiques qui définissent l'intelligence du réseau (et nous préférons parler de système de gestion automatique que d'intelligence) mais plutôt, d'une part, le mode de circulation de l'énergie et de l'information, et d'autre part, l'échelle à laquelle les échanges sont réalisés. En effet, comme nous l'avons signalé plus haut, les smart grids et les BEPOS, reposant tous deux sur une base technologique relativement standardisée, jouent un rôle différencié dans la gestion de la production et du

transport de l'énergie selon que l'on observe les échanges énergétiques et informationnels du haut vers le bas ou du bas vers le haut.

L'image du grille-pain empruntée aux débats anglo-saxons sur le sujet (selon la devise « charge your car and check your toaster on smart grid ») peut en donner une idée approximative : dans une approche top-down, le grille-pain abrité par un BEPOS dialoguera avec une production centralisée à l'échelle du territoire national ou européen avant d'être effacé ou différé selon une finalité objective de production macroscopique et de grand transport ; dans une démarche horizontale et bottom-up, le grille-pain conversera d'abord avec les systèmes de production du bâtiment, puis ceux du quartier, etc., avant de subir un effacement selon des objectifs d'autonomisation énergétique emboîtés (autonomie du bâtiment, du quartier, de la ville, jusqu'au territoire). Selon ces deux configurations, les « boîtes noires » qui seront implémentées dans les smart grids (et qui matérialise les services et les applications correspondantes) seront totalement distinctes tout comme les choix de conception des BEPOS.

Dans le premier cas, le modèle d'optimisation cherchera plutôt à garantir un bilan énergétique positif sur l'année et à maximiser le rendement économique des échanges avec le système délocalisé ; dans le second, il tentera d'épuiser en temps réel et au mieux, selon une dynamique horo-saisonnière, les ressources d'énergie les plus proches (du bâtiment au territoire) et maximisera l'autonomie énergétique de l'agrégat territorial réputé comme optimal.

Ces deux options auront pour effets de promouvoir des solutions très différentes tant en matière de dimensionnement des systèmes qu'en termes de type d'ingénierie. A titre d'exemple, un BEPOS soumis à un lien direct avec le système de production central disposera de systèmes de compensation (solaire ou cogénération) dimensionnés au plus juste sur la base des consommations annuelles. La contribution de cette compensation du bâtiment sera toujours considérée comme marginale d'un point de vue macroscopique au moment de la conception et aucun effet de rétroaction (feed-back) ne pourra être de fait constaté lors du dimensionnement : en termes plus simple, un BEPOS inscrit dans cette configuration tentera de compenser sa consommation de l'ordre de 50 kWhep/m<sup>2</sup>/an par une production électrique d'origine solaire ou grâce à un système de cogénération et considérera les émissions de CO<sub>2</sub> forfaitaires livrées par les opérateurs centraux (à savoir, par exemple, 70 geqCO<sub>2</sub>/kWh<sub>ep</sub> actuellement pour l'éclairage). Découleront d'une telle approche, des solutions techniques relativement standardisées puisque toutes soumises à un même type de contraintes de compensation.

L'approche locale qui rompt ce lien direct développera quant à elle des solutions d'une bien plus grande variété : un bâtiment implanté sur un site doté d'une forte production EnR verra son obligation de compensation diminuer par rapport à celle d'un édifice situé dans un site en étant peu pourvu. Dans ce cas, la conception d'un BEPOS s'inscrit d'abord dans la stratégie énergétique locale puis dans celle relevant du niveau national. Par analogie à ce qui a été évoqué plus haut, pour neutraliser une consommation de 50 kWh<sub>ep</sub>/m<sup>2</sup>/an, le BEPOS pourra tenir compte des productions locales d'EnR (et modifier de fait l'intensité carbone des émissions) mais devra également envisager les consommations du site dans lequel il est implanté. Cette double prescription conduira à des choix dans la conception des BEPOS aussi divers qu'il existe de situations énergétiques, tant en termes de consommation que de production, et aussi variés qu'il y a de stratégies locales.

Réduisant de fait la distance scalaire entre systèmes énergétiques, les collectivités pourront ainsi manœuvrer des leviers plus nombreux et bien plus intégrés qu'ils ne le sont dans la configuration centralisée en cours actuellement.

Selon toute hypothèse, cette contrainte devrait conduire les collectivités à aller jusqu'aux limites de capacité de production de chacun de ses bâtiments et à produire localement l'appoint nécessaire : il est fort à parier que cet appoint soit plutôt peu émissif au regard des politiques d'émissions de CO<sub>2</sub> annoncées dans les Plans Climat-Energie et déclinées ces dernières années à l'échelle locale.

### **I.3. Les notions associées aux techniques de gestion dynamique de la demande d'énergie**

---

#### **I.3.a. Les systèmes d'usages constitutifs de la demande dans le secteur du logement**

Fondé sur le pilotage de la demande en fonction d'objectifs variés et ce, quelles que soient les configurations qui domineront le marché, le déploiement des smart grids ou de la GTB des BEPOS risque fort, dans un premier temps, de buter contre des résistances d'ordre socioéconomique. Il n'est en effet pas certain que l'atténuation de la demande en périodes de pics (pour ne citer que cet objectif lié à la configuration centralisée) ne soit garantie à cause de l'incompressibilité de certains postes de consommations, de tels postes ne pouvant être modulés pour des raisons sociologiques ou économiques (notamment dans le secteur des activités). Si on se restreint au secteur du logement, il est même quasi acquis que plusieurs usages ne pourraient ni être totalement effacés, ni être reportés sans contraintes fortes (notamment tarifaires). La complexité dans la typologie des postes entrant dans la gestion des smart grids sera assurément accentuée par un autre système, quant à lui non technologique : il s'agit essentiellement du système formé par les usages et les pratiques au sein du logement qui entretiennent nombre d'interrelations.

En effet, même si les techniques de gestions et de commandes énergétiques automatiques à l'échelle du bâtiment ou à des échelles plus macroscopiques regardent aujourd'hui ces postes comme des entités isolées, il est incontestable que les effacements de certains d'entre eux engendreront le report en cascade, indésirable du point de vue de l'optimisation recherchée, d'autres usages. Résultat pour le secteur du logement : soit l'optimisation ne pourra être accomplie à cause du blocage émanant des modes de vie des ménages, soit ces derniers seront totalement déstructurés au point de rendre totalement inopportune la technologie, et ce, malgré le fait que nombre d'usages puissent être séparément reconnus comme effaçables par les opérateurs et les usagers eux-mêmes.

Quelle que soit la configuration des smart grids, les charges induites par les postes de consommations sont bien le produit d'un système des usages propre à des pratiques de vie et non pas d'usages individuels parfaitement isolés. Pour reprendre l'exemple du grille-pain, effacer ce poste par report dans le temps, en supposant que ce soit faisable, conduit à effacer la cafetière ou la bouilloire qui l'accompagne généralement. Sans stockage, le report d'un usage entraîne ainsi le report d'une chaîne ou déforme le système entier des pratiques en œuvre dans les logements. Lorsqu'on envisage l'acceptabilité sociale des smart grids ou de la GTB des BEPOS, il est ainsi primordial d'examiner une acceptabilité systémique liée aux

pratiques observables et non pas uniquement celle liée à des usages théoriques pris un par un<sup>7</sup>.

Or, admettre l'existence d'une acceptabilité des systèmes des usages conduit à admettre sa variabilité au regard de la multitude des pratiques de vie : il est en effet démontré que l'acceptabilité augmente avec le niveau de contraintes que les ménages subissent vis-à-vis de l'énergie. Dans ce contexte, l'acceptabilité rejoint la captivité (dans le sens donné par l'économie) en fonction du niveau de précarité énergétique subie. L'acceptabilité dans ce contexte n'est pas seulement la résultante des caractéristiques intrinsèques de la technologie smart grid ou BEPOS mais bien de la structure socioéconomique qui l'accueille.

Outre une variabilité induite par la diversité des profils des ménages qu'il est extrêmement difficile de modéliser, on peut présumer encore que l'acceptabilité fluctue en fonction de la configuration que prendra la gestion des échanges énergétiques et du mode d'optimisation que la technologie adoptera : l'effacement de son grille-pain pour optimiser le bilan énergétique de son propre logement (que ce dernier soit un BEPOS ou non) n'est en rien équivalent à celui que l'on pourrait exécuter afin de participer à la régulation des pics de la demande à l'échelle nationale. On peut ici émettre l'hypothèse que l'acceptabilité sociale est d'autant plus grande que la proximité scalaire avec l'objet de l'optimisation est importante. Selon une telle hypothèse, qu'il serait indispensable de valider rigoureusement (mais qui n'a pas été vérifiée dans cette recherche), la configuration horizontale et bottom-up serait sans aucun doute plus favorable à l'acceptabilité sociale que ne pourra l'être une configuration top-down centralisée.

Néanmoins, sachant, comme nous l'avons noté plus haut, qu'une structure basée sur des échanges horizontaux et bottom-up cherchera plutôt à maximiser l'exploitation de la production locale de l'énergie, il est à craindre (comme on le démontrera dans la partie IV) que, malgré une acceptabilité éventuellement plus grande, les demandes d'effacement du système des usages électriques soient bien plus contraignantes que celles résultant d'une organisation top-down. En effet, adapter sa consommation à une production locale dominée par les énergies renouvelables revient à la soumettre à un mix de production plus rigide (car moins foisonnant) et plus volatile (car dépendant d'une production fatale moins prévisible). Vérifier l'hypothèse que l'acceptabilité des systèmes d'usages croît avec la proximité scalaire ne pourra donc faire l'économie d'examiner le lien avec une augmentation en intensité des obligations d'effacement.

### **1.3.b. Le système énergétique territorial**

L'autre distinction notable entre les configurations top-down et bottom-up réside dans l'appréhension de la dimension spatiale des questionnements. La configuration top-down est considérée à juste titre comme « déspatialisée » car découplée des spécificités locales. La production s'adresse dans ce cas à un ensemble vaste, spatialement peu identifié (hormis lorsqu'il pose des problèmes de grand transport comme dans le cas des régions Bretagne et PACA), pourvu d'une stabilité de charge provoquée par des effets de nombre et d'hétérogénéité. Faisant

---

<sup>7</sup> Outre l'acceptabilité de l'action de ces technologies sur les usages, il est important de saisir comment les données produites par les systèmes informationnels seront employées et comment leur gestion sera regardée par les usagers. Ce point, qui n'entre pas dans le champ de notre problématique, fait l'objet d'un débat déjà très animé.

elle-même l'objet d'un foisonnement important, la production devient de ce fait un ensemble très étendu dont on ignore, dans le raisonnement, la localisation vis-à-vis de la consommation des territoires : la localisation n'est alors regardée que du point de vue des cahiers des charges technologiques (contraintes environnementales et de dangerosité pour les installations thermiques, proximité au réseau hydrologique pour le refroidissement des centrales nucléaires, etc.) ou macroéconomiques et politiques (emploi, compensation financière, etc.).

A l'opposé, la production découlant des BEPOS localise et spatialise très fortement les enjeux. Les multiples réinjections de ces bâtiments concernent avant tout les réseaux de distribution en moyenne et basse tensions, réseaux qui appartiennent physiquement aux collectivités et pour laquelle elles délèguent le service aux opérateurs de l'énergie sous la forme de concessions. Ces apports énergétiques participent directement à la comptabilité des PCET et soutiennent explicitement les stratégies énergétiques locales lorsque ces dernières existent. En élargissant la problématique de la production au territoire, notamment à travers la notion de TEPOS, les collectivités butent de manière effective sur l'éligibilité des espaces disponibles en termes de production et, de ce fait, spatialisent, à l'instar de la configuration top-down, plus fortement les enjeux. La production est, au moins théoriquement, examinée à travers sa proximité spatiale à la consommation locale et les smart-grids sont vues comme des moyens de coupler ces deux éléments.

Enfin, la configuration bottom-up exige de fait une reformulation du système énergétique plutôt inédite face à la situation résultant du contexte français : le système énergétique local se définit alors comme le couple consommation-production d'un agrégat urbain ou territorial dont les composantes sont mises en relation par un réseau physique de distribution ou de transport, réseau susceptible de supporter les divers échanges découlant du renforcement de ce couplage et pour lequel l'état, à un instant donné, peut être livré par un système informationnel.

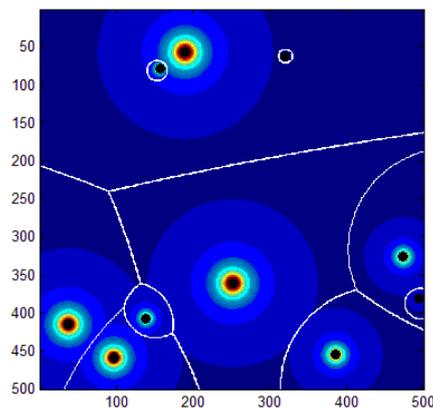
Selon cette définition, que l'on a également choisi d'adopter dans cette recherche, un agrégat urbain est ainsi un ensemble spatialement continu de composantes consommant et produisant de l'énergie et cohérent d'un point de vue énergétique (notamment sous l'angle de son autonomie, que cette dernière soit comptable ou réelle). La délimitation de ce que l'on entend par agrégat dépend pour sa part, lorsque l'on s'intéresse aux smart grids, des gisements d'effacement disponibles à une échelle donnée. L'agrégat est alors le produit de l'exploitation maximale des gisements disponibles et de l'échelle territoriale optimale permettant d'atteindre la plus grande autonomie énergétique possible. Cette autonomie peut enfin être énoncée à partir de critères dynamiques et peut ne pas se limiter à des bilans énergétiques annuels tels qu'ils sont énoncés dans les PCET.

### **I.3.c. L'échelle de la demande et de la production dans une approche spatialisée (les agrégats spatiaux)**

Mais qu'entend-on précisément par agrégat et échelle territoriale ? Ces notions, au sens plutôt fluctuant dans le champ de l'urbain, peuvent-elles être clarifiées pour satisfaire le besoin de quantification inhérent au champ de l'énergétique ? Proposer un énoncé de la notion d'agrégat urbain susceptible de construire une entité énergétique à part entière, opérante scientifiquement, revient à déterminer un mode opérationnel de découpage du territoire suffisamment robuste pour faire l'objet

d'une modélisation. Cela nécessite de laisser de côté l'aspect énergétique du problème que nous nous sommes posés jusqu'ici pour adopter un raisonnement plus général et plus théorique.

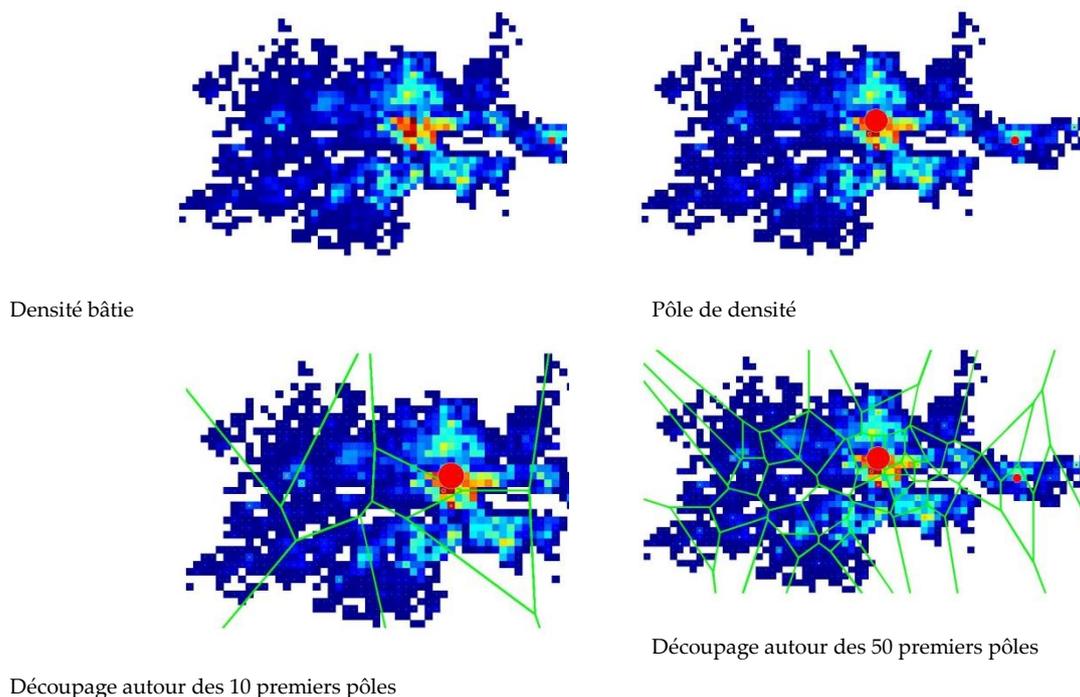
On peut considérer, comme nous le ferons désormais dans cette recherche, que le découpage du territoire en agrégats de bâtiments est appréhendable à partir de la notion de polarité (dans le sens géométrique). Un bâtiment ou une portion du territoire peut être envisagé comme un centre ou un pôle s'il présente en quantité, et plus que ses voisins spatiaux, une caractéristique (un paramètre) réputée pertinente du point de vue de la centralité. A titre d'exemple, la densité ou l'ancienneté d'un bâtiment ou d'une portion du territoire (du point de vue du COS) peut représenter un pôle de centralité relativement au voisinage (une portion du territoire plus dense que son environnement immédiat constitue, selon cette acception, un centre autour duquel « gravitent » des portions moins denses, les limites de ce champ « gravitationnel » constitue la frontière de l'agrégat). Cette définition permet de réduire la polarité à la « quantité » de lien spatial et paramétrique entre un bâtiment et son territoire. La géographie emploie généralement un modèle gravitaire pour exprimer cette quantité de lien.



**Figure 1 : Champ gravitationnel autour de pôles théoriques de masse distincte**

Un bâtiment ou une portion de territoire sont d'autant plus centraux qu'ils maximisent le paramètre de centralité relativement à la distance au voisinage. L'intensité de ce lien est ici appelé ordre du pôle. C'est lui qui détermine les dimensions des agrégats et, par abus de langage, l'échelle de l'analyse. A titre d'exemple, un découpage d'ordre 1 signifie que le territoire est découpé autour du pôle le plus central du point de vue du paramètre, ou plus précisément qu'il ne fait l'objet, de fait, d'aucun découpage. Un fractionnement d'ordre 2, 3, etc., signifiera par conséquent que le territoire est morcelé en 2, 3, etc., zones autour des 2, 3, etc. premiers pôles. L'échelle 1 coïncide avec celle de l'agglomération, l'échelle correspondant à un ordre égal aux nombres de bâtiments avec celle du bâtiment.

Les avantages d'une telle décomposition du territoire est que l'échelle devient de fait indépendante du nombre de bâtiments qui constituent chaque agrégat d'une part, et que, d'autre part, l'on garantit la continuité spatiale du territoire. Elle permet en outre, de définir les échelles sur des principes robustes, qui ne varient pas selon les acceptions usuelles (échelle de quartier, urbaine, etc.).



**Figure 2 : Découpage sous Toaster de l'agglomération de Tours à partir des pôles de densité (COS)**

Bien entendu, le nombre de polarités sur le territoire dépend directement de la résolution et de la forme du maillage sur laquelle est fondé le calcul du paramètre en question (ici le COS). Problème relativement classique en géographie, le nombre de pôles procède effectivement du nombre de mailles. Pour lever cet obstacle méthodologique, la localisation des pôles est, dans cette recherche, déterminée par les points de convergence résultant de maillages itératifs, ces derniers débutant par la plus grande maille possible (une seule maille enveloppant toute l'agglomération) à la plus petite (correspondant à un seul bâtiment) pour des formes de mailles quelconques.

Le protocole que l'on vient de décrire permet par conséquent de modéliser la progression scalaire contenue dans l'intitulé de cette recherche : « de l'échelle du bâtiment à l'échelle du territoire » équivaut à examiner les charges énergétiques dynamiques de chaque zone du territoire selon des découpages partant d'un ordre égal au nombre de bâtiments à un ordre égal à 1. Pour chaque niveau scalaire, on peut ainsi examiner quantitativement les gisements d'effacement disponibles en fonction d'optima établis (ou non) par mode de découpage de l'espace (par exemple, on peut autant soumettre chacun des agrégats à un effacement correspondant à la courbe de charge nationale, qu'à la courbe de production locale en énergie renouvelable fatale, qu'à la production solaire des BEPOS qu'ils contiennent, etc.). Enfin, la définition de l'échelle fondée sur la polarité a l'avantage d'identifier spatialement l'instant à partir duquel apparaît un foisonnement des charges énergétiques. Considéré à tort comme imperceptible hormis pour de très grandes étendues, le foisonnement peut être envisagé à partir d'examen plus précis réalisés sur des zones de tailles bien plus réduites.

#### **I.3.d. Le foisonnement**

Mais avant d'estimer à quelle échelle optimale apparaît un foisonnement réputé significatif, il est, à ce stade, indispensable de définir une nouvelle fois ce dernier de façon plus précise que ce que proposent généralement les débats sur le sujet. En effet, et à l'image de l'échelle spatiale vue précédemment, ce terme contient également une indéniable ambiguïté qu'il est possible de lever à partir d'une proposition de modélisation.

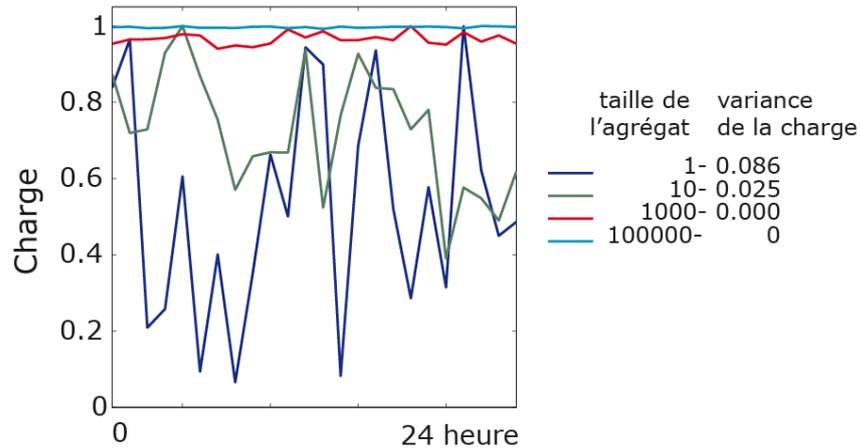
La charge énergétique d'un territoire, quelle que soit sa taille, découle de l'addition des charges individuelles propres aux unités qui le compose, notamment des bâtiments, et des pertes induites par l'imperfection du transport et de la production de l'énergie sensés répondre à la demande résultante. Si l'on se focalise sur cette demande, sa dynamique forme ainsi, dans la durée, une courbe de charge cumulée. On remarque que cette courbe possède, à partir d'une certaine échelle d'analyse et en fonction des jours de la semaine et des saisons, une allure typique (des creux et des pics) que l'on retrouve pour tous les territoires, à condition que ces derniers soient de taille plutôt importante et soient suffisamment hétérogènes (d'un point de vue fonctionnel).

Le foisonnement se définit généralement comme le processus de stabilisation de l'allure d'une courbe de charge cumulée de la demande. L'instant critique, rarement quantifié dans la littérature scientifique sur le sujet, représente l'instant à partir duquel la stabilisation émerge, et peut être baptisé « point de foisonnement ». Il correspond à l'échelle à partir de laquelle la courbe de charge ne modifie plus son aspect, échelle qui peut être quant à elle appelée « échelle de foisonnement » (ou, pour reprendre la définition de l'échelle précédente, « ordre » correspondant au découpage du territoire en agrégats ayant chacun atteint son point de foisonnement). Il s'agit d'un nombre minimal d'unités (de bâtiment, d'îlot, etc.) qui construit un ensemble spatialement continu et pour lequel on estime que le point de foisonnement est numériquement atteint.

Pour déterminer ce nombre, des indicateurs simples peuvent être employés à l'image de la variance d'une courbe de charge sur une période de 24 heures. On peut ainsi estimer dans un premier temps que le foisonnement correspond à l'instant pour lequel la variance calculée pour chaque échelle ne varie plus et converge vers une valeur donnée.

Pour déterminer d'une manière totalement théorique une telle échelle, on peut d'abord considérer que chaque unité d'un ensemble (chaque bâtiment d'une ville) appelle une charge d'énergie de manière totalement aléatoire, ce qui revient à dire que la demande de ces derniers est parfaitement hétérogène. L'exercice revient à déterminer combien de bâtiments devront être réunis spatialement afin de bâtir un agrégat dont on estime le foisonnement comme abouti.

D'un point de vue théorique, le regroupement des bâtiments en un agrégat se réalise lorsque la somme des charges individuelles résulte sur une courbe assimilable à une droite (d'un point de vue strictement mathématique ce moment n'arrive jamais, d'un point de vue numérique, il est atteint lorsque la variance est considérée comme statistiquement négligeable). Le long d'une période de 24 heures, la somme des dynamiques de charges individuelles normalisées se stabilise dès lors que l'on excède un regroupement d'environ 1000 unités. Ce processus est illustré dans la Figure 3, la courbe rouge correspondant à l'agrégat de taille minimale.



**Figure 3 : Foisonnement théorique en fonction de la taille de l'agrégat**

Cette analyse théorique permet de supposer que le foisonnement est toujours atteint pour des agrégats inférieurs à 1000 unités car on sait que les dynamiques des charges des bâtiments ne sont jamais totalement aléatoires et que la demande n'est jamais totalement hétérogène. En effet, si l'on réalise le même calcul en augmentant les probabilités pour chaque unité d'appeler de l'énergie aux heures de pointes le point de foisonnement apparaît bien plus tôt, à savoir, pour environ 60 bâtiments.

### **I.3.e. L'effacement des usages**

L'effacement d'un usage ou la modulation de la charge ont pour objectif d'éviter que le foisonnement n'engendre des pics de consommations supérieurs à la capacité de transport ou de production disponible à un instant donné. L'effacement est donc la suppression pure et simple de tout ou partie d'un usage à un instant présumé critique. Cela ne signifie pas que cette suppression est définitive, mais qu'elle peut tout simplement être ajournée à des moments pour lesquels on dispose de capacités d'infrastructures suffisantes. L'effacement est pour ainsi dire une capacité négative que l'on identifie explicitement comme telle et avec laquelle on « joue ». Ce jeu a pour but de modifier l'allure du foisonnement afin de le faire correspondre à la capacité disponible. À l'identique des capacités de production ou de transport, l'effacement varie dans le temps, au fil des heures et des saisons, en fonction de logiques exogènes au système strictement énergétique.

À ce titre, pour le secteur du logement, les smart grids doivent pouvoir distinguer plusieurs types d'usages au regard de leur capacité à être effacés, tous intimement liés aux modes de vies des ménages concernés. Citons à titre d'exemple les usages totalement effaçables, ceux effaçables avec un report plus ou moins important sans dégradation du service rendu et ceux reportables avec un léger ou un important différé au prix d'une dégradation du service plus ou moins acceptable.

Quel que soit leur statut, et comme nous l'avons énoncé plus haut, les usages sont toujours motivés par des logiques propres au ménage et forment un système avec les pratiques domestiques (et, sûrement, les représentations symboliques) qu'il est extrêmement délicat de modéliser. L'effacement doit être donc regardé comme une injonction plus ou moins directe (pouvant éventuellement prendre la forme d'une sanction ou d'une gratification) de rendre disponible une capacité de production ou de transport et de rendre réalisables d'autres usages estimés à cet instant comme

ineffaçables (et donc prioritaires d'un point de vue énergétique). Malgré la difficulté à formaliser la déformation du système des pratiques et des usages dans un logement, il est possible de mesurer à quel point ce dernier résiste et dégrade le gisement théorique d'effacement.

## **I.4. Les diverses finalités de la gestion dynamique de la demande**

---

### **I.4.a. La notion de gisements appliquée à l'effacement des usages**

Ce gisement, dans le cadre de l'effacement ou de la modulation, est quant à lui une notion bien plus complexe que celle usuellement admise dans le champ de l'énergétique. Habituellement, il se définit défini comme une quantité d'énergie inutilisée dans le présent que l'on juge exploitable d'un point de vue prospectif : il est généralement assimilable à une ressource exprimant une grandeur absolue et possédant de ce fait une unité (par exemple, des kWh). On parle alors de gisement d'économie d'énergie, de gisement en énergie renouvelable, etc. Ces grandeurs théoriques sont communément dégradées par les conditions technico-économiques propres à leur mise en œuvre (meilleures techniques disponibles –MTD, rendement économique-énergétique, etc.).

Dans le cadre de l'effacement, la notion rencontre deux éléments qui contribuent à la rendre plus complexe que cette définition : d'une part, l'effacement projeté est tributaire de la capacité que l'on tente de dégager, cette dernière dépendant de la fonction objective que l'on souhaite résoudre, d'autre part, de la nature dynamique du foisonnement et des capacités effectivement disponibles. En d'autres termes, le gisement d'effacement varie doublement : dans le temps et en fonction de l'objectif que l'on espère atteindre.

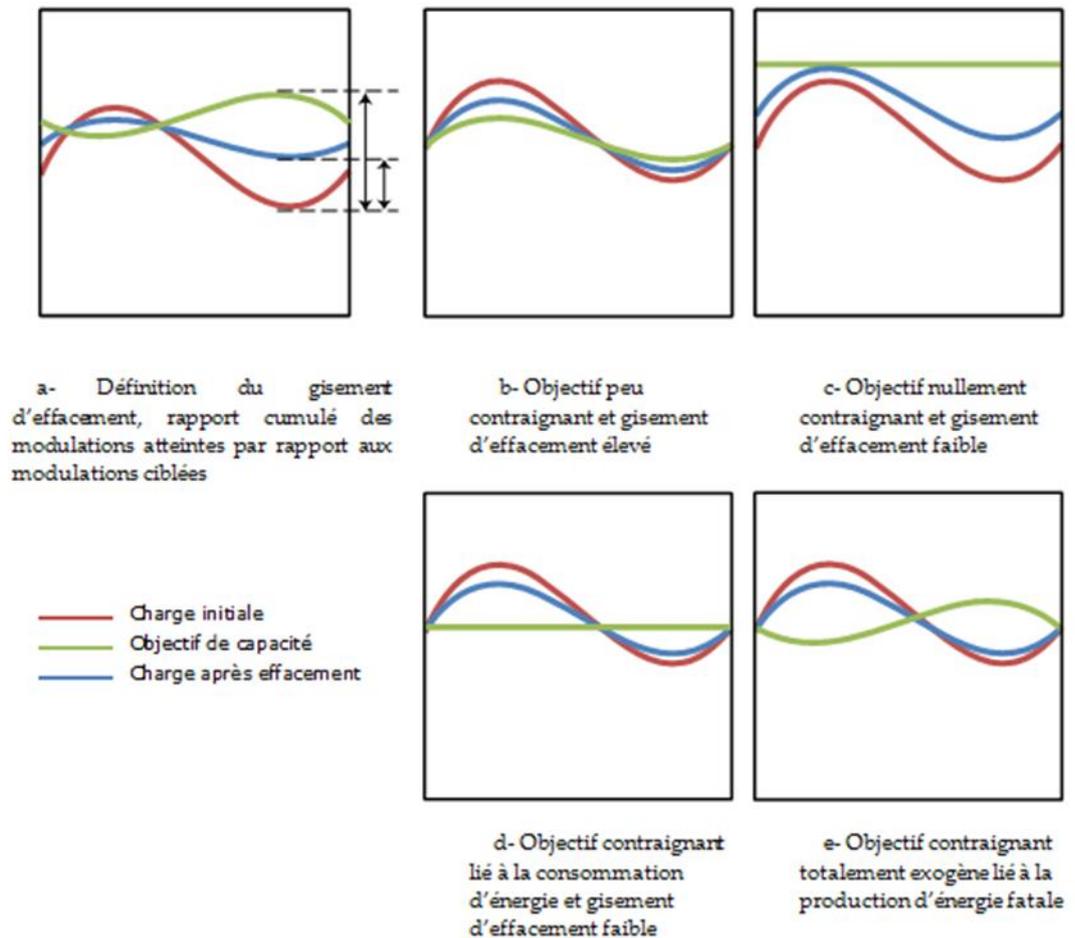
Cette double dépendance augmente les risques de tautologie : en effet, maximiser le gisement d'effacement peut conduire à faire artificiellement coïncider l'objectif de capacité à la dynamique de la demande et donc à rendre tout besoin d'effacement ... inutile ! A titre d'exemple, moins la courbe de capacité que l'on tente d'atteindre sera contraignante face au foisonnement de la demande (en d'autres termes, plus l'offre sera capable de répondre à la demande), moins l'effacement sera nécessaire et, paradoxalement, plus le gisement sera réputé élevé relativement à la cible. Autre exemple : en situation de surcapacité, alors qu'aucun effacement n'est exigé, le gisement pourra quant à lui se révéler extrêmement faible puisqu'il sera de fait impossible, du point de vue de l'énergie et non pas de la puissance, de modifier la courbe de la demande pour qu'elle concorde avec celle des capacités.

Dans un tel contexte, l'expression du gisement d'effacement, qui se mesure par l'ampleur de l'écart entre plusieurs dynamiques ne peut être résumée à un seul indicateur : ce dernier, comme nous le proposerons plus loin, devant toujours être regardé en tenant compte de la dynamique de la capacité que l'on cherche à libérer.

### **I.4.b. Les objectifs de capacité selon les configurations top-down et bottom-up**

Pour réduire au mieux une formulation tautologique des objectifs d'effacement, il est par conséquent indispensable de rendre les variations de chacune des courbes les plus indépendantes possible l'une de l'autre (objectif de capacités et

foisonnement de la demande). La courbe de capacité disponible doit évoluer indépendamment de la demande effective à partir de variables parfaitement exogènes. Citons à titre d'exemple, deux familles de variations de capacité qui seront examinées dans ces pages et qui expriment ces précautions.



**Figure 4 : Gisement d'effacement et profil des courbes de capacité objective**

Dans les configurations *top-down* propre à la France depuis plus d'un demi-siècle, la production et le transport de l'énergie ont été conçus et dimensionnés pour satisfaire une demande croissante. Les logiques d'investissement étaient alors endogènes à la structure de la demande : il s'agissait, si l'on simplifie, d'accompagner ou même de dépasser la demande de puissance par l'implantation de nouvelles infrastructures (au point de corriger les situations de surcapacité électrique dans les années 1980 par une stimulation de la demande !). Les besoins d'effacement ne sont apparus que lorsque des logiques exogènes se sont opposées à l'investissement : élargissement de l'aire de desserte et interconnexion à l'échelle européenne, retards concernant le financement des infrastructures, etc.). Ce sont ces logiques qui découplent plus ou moins fortement l'offre en capacité de la demande effective. La modulation des charges ou l'effacement des usages n'ont de sens que dans un contexte de fort découplage ou, en d'autres termes, l'exercice de quantification de gisement d'effacement n'a d'intérêt qu'en situation de pénurie de capacité. Pour caricaturer, dans une configuration centralisée, la courbe objective doit exprimer la dynamique des capacités dont les variations s'expliquent par des

logiques à dominante technico-industrielle (maintenance et remplacement des installations, exportation, etc.), notamment à travers la suppression, en hiver, des pointes du matin et du soir.

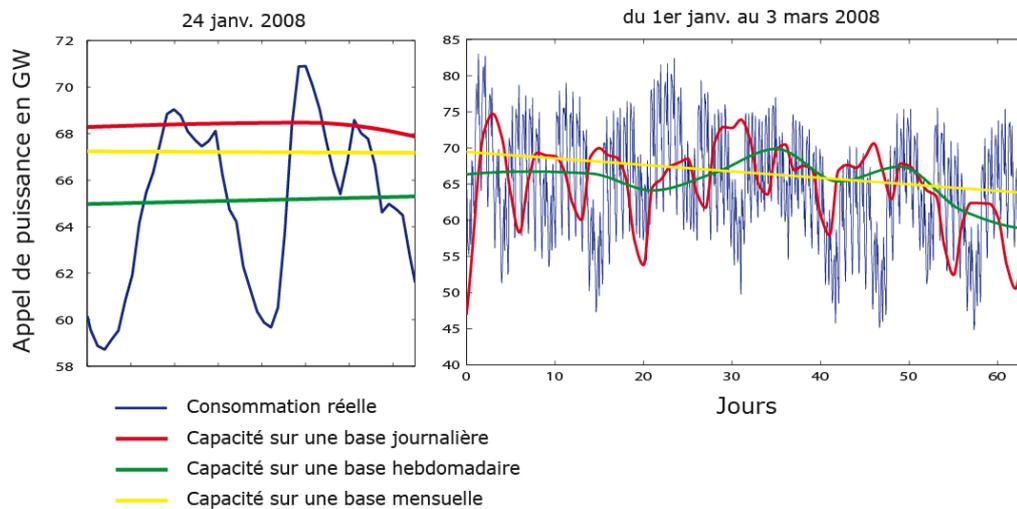
Ces logiques se retrouvent bien entendu dans la configuration *bottom-up*. Néanmoins, si l'on suppose que cette dernière incarne une production à dominante renouvelable de type fatale, le caractère exogène des variations des capacités est accentué par la volatilité des conditions météorologiques qui déterminent la ressource (volatilité improprement appelé intermittence). En effet, la production effective d'énergie fatale, d'origine éolienne ou solaire, peut être assimilée à une capacité de fait puisque il est impossible, par définition, qu'elle excède la disponibilité de ces ressources dites de flux : à l'instar d'une production fondée sur des énergies stockables avant transformation (fossiles ou hydrauliques) dont les capacités disponibles concordent avec les capacités matérielles (une puissance disponible de 1 MW pour une central au gaz ou au charbon est mobilisable à tout moment si la demande l'exige), les productions fatales sont tributaires de la variation de la ressource (une puissance disponible de 1MW pour des panneaux photovoltaïques n'est mobilisable que si le rayonnement solaire le permet). Enfin, dans le cas d'une production exclusivement fatale, les gisements d'effacement risquent d'être d'autant plus faibles que la courbe de capacité est totalement indépendante de celle de la demande.

#### **I.4.c. Les objectifs de capacité déterminée par la consommation et la production d'énergie : le cas de la production des BEPOS**

Une dernière famille d'objectifs de capacité complète les deux précédentes. Exprimée en puissance, les objectifs cités plus haut ne traitent pas directement de la question de l'énergie. Or, le lien entre puissance et énergie, bien qu'asymétrique (la dynamique des puissances détermine la quantité d'énergie, l'inverse n'étant pas vrai), peut être envisagé à partir du couplage de ces deux dimensions : connaissant le besoin en énergie d'un territoire, il est possible de chercher un effacement qui permet de dimensionner les infrastructures, non pas à partir du pic de la demande à un instant critique, comme l'impose l'ingénierie classique, mais plutôt en fonction d'une capacité minimale théorique indépendante de l'instabilité du foisonnement. Sachant, à titre d'exemple, combien d'énergie est consommée en une journée, il est possible de déterminer qu'elle sera la capacité journalière minimale qui satisfera la demande et ce, indépendamment des fluctuations d'appel de puissance : numériquement, cette capacité représente la puissance moyenne appelée tout le long de la journée.

Ce raisonnement à plusieurs avantages tant d'un point de vue scientifique qu'opérationnel : d'une part, une consommation qui concorderait avec la capacité minimale journalière, si elle pouvait être atteinte grâce à la modulation, permettrait de produire de l'énergie à la puissance nominale d'infrastructures de taille la plus réduite possible et à maximiser le rendement de production de ces dernières (en effet, une centrale thermique qui fonctionne à plein régime possède un meilleur rendement que lorsqu'elle travaille en sous-régime) ; d'autre part, une production à un niveau constant permet de soustraire la production de toute prévision de la demande. D'un point de vue scientifique, opter pour des courbes lissées à partir d'une moyenne temporelle des puissances appelées (journée, semaine, saison, etc.), permet d'une part, de rendre totalement indépendantes des variations de la

demande les courbes d'objectifs de capacité (sans pour autant rompre totalement avec la demande), d'autre part, de résoudre le paradoxe des gisements d'effacement relatif aux situations de surcapacité évoqués plus haut.



**Figure 5 : Objectifs de capacités sur la base des productions lissée d'énergie journalières, hebdomadaires et mensuelles à l'échelle nationale pour une période de 2 mois (à partir des données RTE pour les deux premiers mois de l'année 2008).**

Au-delà de la question de la minimisation des infrastructures, la détermination de la courbe de capacités sur la base d'une énergie journalière ou saisonnière (et non plus exclusivement de la puissance et de l'allure du foisonnement), permet de mettre en évidence les divers flux d'échanges énergétiques pouvant apparaître entre les territoires, les échelles et/ou les systèmes techniques de stockage. Citons, à ce titre, un exemple de situation qui démontre cette assertion. Supposons un territoire désirent, dans un premier temps, atteindre une autonomie énergétique d'un point de vue comptable à travers l'aménagement de zones constituées uniquement de bâtiment BEPOS : l'énergie produite grâce à des panneaux solaires photovoltaïques ou à une cogénération étant égale *annuellement* à l'énergie finale consommée. Cette autonomie n'est bien entendu nullement réelle puisqu'à chaque instant de l'année le territoire rencontre deux situations opposées : une situation, d'une part, de sous-production lorsque le solde entre consommation et production est négatif (la nuit pour le solaire), d'autre part, de surproduction en cas de solde positif (le jour en été). Or, ces valeurs du solde déterminent divers enjeux territoriaux ou techniques. En situation de balance positive, le territoire peut dans une certaine mesure, stocker le surplus d'énergie ou l'exporter à un autre agrégat territorial ; dans la situation inverse, il est contraint de déstocker ou d'appeler la production d'autres agrégats ou d'autres échelles (le stockage et le déstockage étant tributaire d'un jeu logistique assez complexe).

Or, c'est bien le jeu de circulation de flux entre les agrégats qui donne tout son sens à la technologie des *smart grids* et aux solutions de modulation de la demande à l'échelle locale propres aux configurations *bottom-up*. En effet, cette technologie joue un double rôle, celui d'épuiser le gisement d'effacement à l'échelle d'un agrégat afin de maximiser l'exploitation des ressources fatales locales et celui d'organiser les échanges à l'échelle de l'ensemble du territoire afin de minimiser le recours à la production centralisée et au stockage. Dans un tel contexte, la finalité du système

formé par les *smart grids* et les BEPOS est d'effacer les usages de telle manière à exploiter le mieux possible la production d'énergie fatale présente dans le territoire et de répartir les surplus à l'échelle locale. Le déficit de puissance subsistant de ces échanges endogènes est apporté par une production centralisée ou par une production thermique locale (selon que l'on priorise les aspects émissifs aux questions énergétiques et que l'on intègre la concurrence entre les intensités carbone du mix de production locale avec celui de la production nationale).

## **1.5. Objectifs de la recherche Toaster**

---

L'avantage d'intégrer la production locale en énergie fatales (et non pas uniquement la puissance) dans la détermination des objectifs de capacité consiste à articuler la dimension dynamique induite par la technologie des *smart grids* à l'aspect plutôt statique des enjeux énergétiques tels qu'ils sont formalisés dans les documents d'urbanisme (principalement PCET). En effet, les territoires se sont emparés de la question énergétique sur la base d'une approche comptable annuelle (à l'image des comptabilités carbone) exprimant combien les territoires pouvaient et devaient consommer et produire de l'énergie mais sans examiner comment ces consommations et ces productions fluctuaient dans le temps. Or, ce sont bel et bien ces fluctuations qui légitiment les technologies de gestion dynamique de la demande et de l'offre et, surtout, qui dimensionnent matériellement les infrastructures, dimensionnement qui affecte directement l'espace et oriente les choix d'aménagement.

Se limitant à une approche locale de l'énergie, mais reposant sur une méthodologie parfaitement applicable à des échelles plus amples, la recherche Toaster, sur la base des définitions présentées dans cette partie, tente dans les pages suivantes de quantifier les gisements d'effacement disponibles en fonction des diverses fonctions objectives présentées plus haut. Il s'agit alors de quantifier ces gisements selon trois options pour le cas de l'agglomération de Tours :

- 1- Eviter les pointes journalières du matin et du soir afin de répondre, par analogie, aux questions posées par les enjeux nationaux de capacité découlant de la configuration top-down des échanges.
- 2- Tenter de moduler la demande afin qu'elle corresponde le plus possible à la capacité minimale théorique journalière, hebdomadaire et mensuel dans le but de minimiser la taille des infrastructures locales
- 3- Maximiser l'exploitation des productions solaires et éoliennes incluant celles des BEPOS.

L'ensemble de ces mesures sont réalisées à différentes échelles selon la définition de l'agrégat urbain livrée plus haut, de l'échelle territoriale (échelle du SCOT) à l'échelle du groupe de bâtiments (quelques dizaines).

L'échelle microscopique du bâtiment et du ménage sont examinées à partir d'analyses microscopiques réalisées en deux temps : d'une part, à partir de l'examen du comportement thermique d'une typologie de bâtiments selon divers scénarii de modulation, d'autre part, sur la base d'une description des pratiques et des usages supposés dégrader les gisements théoriques d'effacement.

## II. Méthode et modélisation

Cette partie donne un aperçu de la méthodologie adoptée lors de la recherche. Elle est prolongée par les annexes.

### II.1. L'architecture du modèle : une approche systémique explicite

---

#### II.1.a. Modèle Toaster

Le modèle Toaster est une plateforme combinant divers modules de calcul énergétique à l'échelle urbaine et territoriale. Ce modèle intègre dans un environnement homogène les différents éléments indispensables à la simulation dynamique des consommations d'énergie thermique et électrique à grande échelle et à l'analyse des effets d'une stratégie de modification des charges énergétiques.

Les modules qui composent Toaster sont les suivants :

- toaster – Heat : calcul thermique dynamique de la consommation d'énergie de chauffage
- toaster – Uses : calcul des consommations d'électricité spécifique (hors chauffage)
- toaster – Solar : calcul du rayonnement solaire sur les tissus urbains
- toaster – Grid : calcul de l'offre et de la demande d'énergie thermique et électrique et de la charge sur les réseaux de distribution et de transport.

Deux modules techniques permettent d'appliquer les calculs à des ensembles urbains

- toaster – Systems : système de conception de modèles de calcul et d'implémentation
- toaster – Geometry : système de gestion et de transformation des bases de données urbaines spatialisées (BDU et SIG) à des fins de calculs énergétiques

L'ensemble de ces modules sont présentés en annexe 1.

#### II.1.b. Mesure de l'efficacité du plan d'effacement

L'effacement est simulé au moyen d'un programme d'optimisation (présenté en annexe 3) qui choisit les ménages et les usages associés à effacer ainsi que l'heure de l'effacement et l'heure du report (on se place ici dans le cas d'usages différables uniquement, non dégradés). Afin d'optimiser la modulation, le programme a besoin de deux choses : les courbes de charges initiales des consommations des différents profils de ménages et une courbe objective qui sera dans l'idéal la courbe de charge souhaitée après modulation par l'effacement.

Afin de mesurer l'efficacité de la modulation, un indicateur simple a été choisi. Il s'agit du rapport entre la valeur de la fonction à minimiser après modulation (après effacement) et la valeur de la fonction à minimiser avant modulation (consommation initiale). En pratique, il s'agit du ratio des distances entre les courbes de charges (avant et après modulation) et la courbe objective.

L'indicateur d'efficacité, que l'on notera  $I$ , vaut donc, pour un territoire  $x$  :

$$I = 1 - \frac{\sum_t [C_{ap.eff.}(t, x) - O(t)]^2}{\sum_t [C_{init.}(t, x) - O(t)]^2}$$

Ainsi, si l'indicateur I est négatif, cela veut dire que la consommation après effacement est « moins efficace » que la consommation avant modulation dans le sens où elle ne permet pas de rapprocher de la courbe objectif.

Si I est proche de 1, alors on se rapproche de la fonction objective.

Si I=1 alors la courbe après modulation est égale à la fonction objective.

On mesure donc l'efficacité de la procédure d'effacement par la mesure de cet indicateur (d'autres indicateurs spécifiques aux fonctions objectives sont proposés dans la description des scénarios modélisés).

## **II.2. Hypothèses de calcul des charges énergétiques à l'échelle urbaine : application à l'agglomération de Tours**

---

### **II.2.a. Composition typologique du bâti et reconstitution des systèmes de chauffage**

Les données issues du module t-Geometry permettent de localiser finement (maille IRIS 2000) les différents bâtiments étudiés. Nous avons donc accès à la localisation des bâtiments, leur hauteur et leur emprise au sol (surface au sol occupée par le bâtiment).

Un travail a donc été effectué pour permettre le croisement de ces informations et du RGP 2008 de l'INSEE et ainsi affecter aux bâtiments une composition des ménages et préciser les attributs de chacun des bâtiments.

Dans un premier temps, à chacun des bâtiments ont été attribuées des informations concernant la période de construction (selon la typologie du RGP), le mode de chauffage principal et le combustible utilisé (il s'agit d'une simplification étant donné que ces attributs concernent plutôt les logements que les bâtiments). Pour ce faire, une évaluation de la répartition du nombre de logements par IRIS, période de construction, mode et combustible de chauffage a été réalisée au moyen du RGP (par exemple, dans l'IRIS « Centre 1 » (centre de Tours), le nombre de logements construits avant 1949 et chauffés au moyen de chauffage individuel électrique est de 811). Cette répartition permet de distribuer ces différents attributs aux bâtiments identifiés.

Le résultat de cette première phase est donc un enrichissement des données du module t-Geometry : chaque bâtiment est ainsi qualifié par sa période de construction, son mode de chauffage principal, type de combustible, localisation, hauteur et emprise au sol.

Les résultats obtenus sur la zone d'étude sont présentés en III.1.a.

### **II.2.b. Reconstitution de la typologie des ménages**

Il s'agit maintenant de préciser les logements/ménages présents à l'intérieur de chacun des bâtiments : dans le cadre de l'utilisation de CHARTER®, il a été choisi de conserver des informations impactant fortement les consommations électriques (hors chauffage) : structure familiale du ménage (personne seule, couple avec 1

enfant etc...), nombre de personnes du ménage. De manière similaire à la première étape, une répartition des logements selon ces critères a été réalisée au moyen du RGP. Les différents logements décrits dans le RGP ont donc été affectés aux bâtiments identifiés selon la surface réelle des bâtiments.

Le résultat final produit par cette deuxième étape est donc une qualification complète des bâtiments, permettant de préciser pour chacun d'entre eux le nombre de logements occupés par les différents types de ménages. Ces données permettent d'évaluer les consommations électriques hors chauffage des bâtiments de la zone étudiée au moyen des données issues de CHARTER®. Les résultats sont présentés en III.1.a.

### **II.3. Hypothèses relatives aux usages spécifiques de l'électricité dans les logements**

---

#### **II.3.a. Le modèle Charter®**

CHARTER® est un outil permettant la reconstitution de la demande d'électricité pour les usages spécifiques du résidentiel. Autrement dit pour tous les usages pour lesquels l'électricité est l'unique vecteur énergétique possible. Le modèle permet cette reconstitution de l'échelle du ménage.

En se basant sur les données du recensement de la population réalisé par l'INSEE, l'outil permet de calculer la consommation des ménages français pour environ une trentaine d'usages différents regroupés dans les catégories suivantes : Produits blancs, Froid, Cuisson concurrentielle, Produits bruns, Produits gris, Cuisson spécifique, Nettoyage, Autres. Il est à noter que la production d'eau chaude est traitée indépendamment par l'outil ENERTER®.

L'outil se base sur un recoupement des fichiers de recensement INSEE de l'année 2008. Cette description précise des ménages français et des logements dans lesquels ils vivent va permettre de caractériser le comportement des ménages et donc leur consommation. En effet en fonction de l'âge ou du métier des individus ou encore en fonction du type ou de la surface d'habitation, les tendances de consommations ne sont pas les mêmes selon les usages. Par exemple un couple de retraités ne va pas consommer de la même manière qu'un étudiant vivant seul ou qu'un couple avec enfants. Ces différences de comportements ont été modélisées au sein de l'outil.

La consommation par usage a été reconstituée au moyen de 3 paramètres de calcul : un taux d'équipement (part de la population équipée d'un réfrigérateur par exemple), un temps d'utilisation annuel (en heures, et la part de veille associée à cet usage notamment pour la télévision) et une puissance moyenne des appareils.

Le produit de ces trois paramètres donne la consommation pour l'usage en question.

Un lourd travail bibliographique a été réalisé afin de spécifier précisément les trois paramètres des équipements pour des catégories de ménages les plus fines possibles : en effet, les usagers ne consomment pas de la même manière selon leur âge, leur catégorie socioprofessionnelle, leur type de logements... Cela n'est pas possible pour tous les usages car ce travail repose sur la bibliographie existante qui n'est pas uniformément fournie pour tous les usages.

A ces consommations par usage et par typologie de ménages peut alors être associée une forme de courbe de charge horo-saisonnière. Cette forme décrit des appels de charge horo-saisonniers d'une journée moyenne par heure, par mois et par journée type (semaine, samedi ou dimanche).

Ces formes peuvent être obtenues de deux manières différentes :

- A partir de campagnes de mesures : Pour les usages sur lesquels des campagnes de mesure sur un échantillon suffisamment important de la population ont été réalisées, la moyenne des résultats obtenus est ainsi utilisée comme base pour la forme de courbe de charge. Des modulations mensuelles peuvent ensuite, lorsque cela est pertinent être attribué à chaque forme obtenue en fonction des typologies de logements concernées et de l'implantation géographique.
- A partir d'outils construits par Energies Demain : Pour les usages thermiques et l'éclairage, des outils de reconstitution de la forme des appels de charge horo-saisonniers moyens ont été développés par Energies Demain. Ces outils sont construits de manière analogue en croisant les besoins des abonnés (présence dans les locaux, température de consigne par exemple pour l'usage chauffage), les conditions extérieures (température pour l'usage chauffage) et les apports internes.

On obtient donc des consommations par usages, type de ménages et par heure de l'année. Cette base de données de consommations horaires est appliquée aux ménages de la zone d'étude afin de pouvoir obtenir des courbes de charge par bâtiment (une agrégation de ces courbes de charge est réalisable depuis l'échelle du bâtiment jusqu'à la zone d'étude complète).

Une méthodologie plus précise est présentée en **annexe 2**.

#### **II.3.b. Les enquêtes sur un échantillon de ménages**

Les enquêtes qui ont été réalisées sur un échantillon de ménages du territoire d'étude sont présentées dans la partie III.2.a.

#### **II.3.c. Les simulations dynamiques sur un échantillon de bâtiments**

Les simulations dynamiques ont été réalisées par Armines et sont présentées en annexe 5 par souci de lisibilité.

### **II.4. Les limites et les avantages de la modélisation**

---

#### **II.4.a. Date du report de consommation**

Le décalage entre l'heure habituelle de l'usage et l'heure à laquelle celui-ci est reporté est au maximum de 8 heures afin de limiter le temps de calcul. Ceci est une limitation car il serait tout à fait envisageable de décaler d'une journée voire plus certains usages sans dégradation du service rendu.

#### **II.4.b. Caractérisation des ménages**

Afin de pouvoir calculer les consommations d'électricité spécifique à partir du modèle CHARTER<sup>®</sup>, il a été nécessaire de réduire la caractérisation des ménages à

un critère simple et aisément accessible. La contrainte de temps de calcul a donc forcé le choix d'une typologie restreinte à 8 types de ménages différents. La typologie choisie a été définie à partir d'une étude de sensibilité du modèle CHARTER® qui a montré que les consommations reconstituées par le modèle sont fortement impactées par le type de famille qui compose le ménage ainsi que le nombre d'enfants présents dans le ménage.

L'étude sociologique menée en parallèle n'est pas nécessairement en accord avec ce choix (identification d'autres facteurs impactant fortement les consommations : nombre d'actifs du ménage par exemple).

La méthode d'association des typologies de ménages aux bâtiments existants est fondée sur d'une part les données issues de la BD TOPO® de l'IGN et d'autre part sur les répartitions observées dans les fichiers détail du recensement (INSEE, 2008). Cette répartition pourrait ne pas être efficace étant donné la nature de polygones (empreinte au sol des bâtiments) issus de la BD TOPO® : ceux-ci sont des îlots et peuvent donc représenter plusieurs bâtiments (ce qui n'est pas décelable). Les résultats sont présentés dans la partie suivante III.1.a.

Cette partie présente les principaux résultats des simulations aux échelles du bâtiment et urbaine et des enquêtes auprès des ménages.

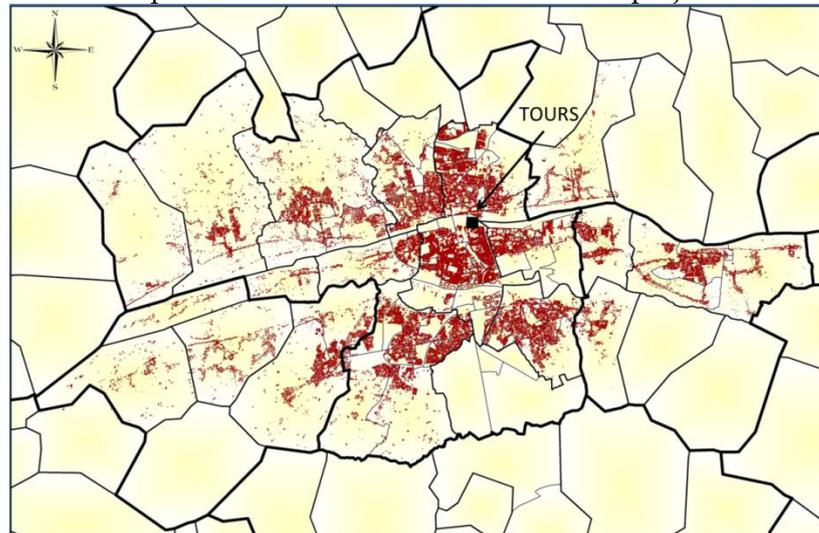
## **II.5. Analyse à l'échelle urbaine**

---

### **II.5.a. La structure énergétique du cas d'étude sur la base des données INSEE de 2008**

La zone d'étude choisie est située dans le département de l'Indre et Loire (37), et constituée de 19 communes dont la ville de Tours.

La carte suivante représente les bâtiments étudiés dans ce projet :



**Figure 6 : Carte de la zone d'étude du projet TOASTER**

Le nombre de bâtiments étudiés est 47 839 pour un nombre de logements d'environ 140 000. La BD Topo utilisée pour localiser les bâtiments est très fine :

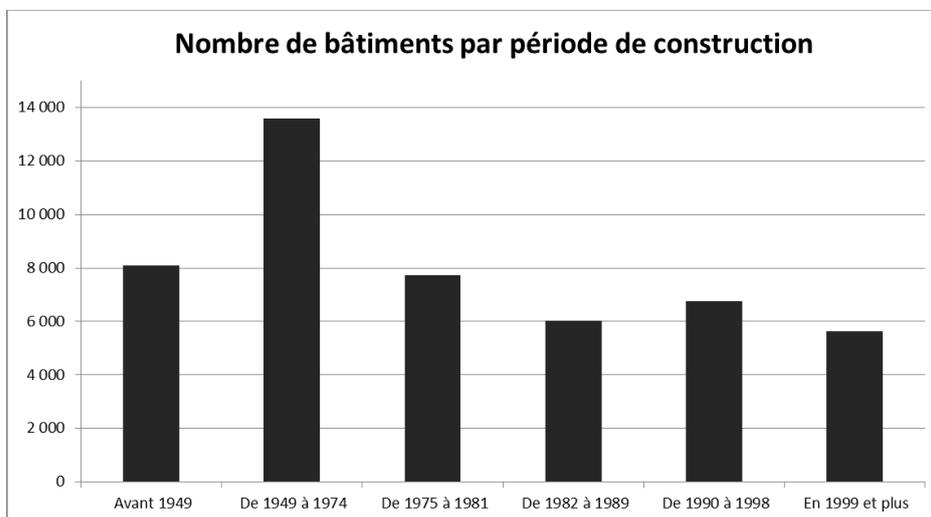


**Figure 7 : Zoom sur les bâtiments étudiés**

Les bâtiments sont ensuite caractérisés par selon plusieurs critères : **période de construction, mode de chauffage principal du bâtiment, nombre de logements, caractérisation des ménages occupant le logement.**

► **La typologie architecturale**

La répartition des bâtiments par période de construction reconstituée selon la répartition effectuée (voir II.2.b) est la suivante :



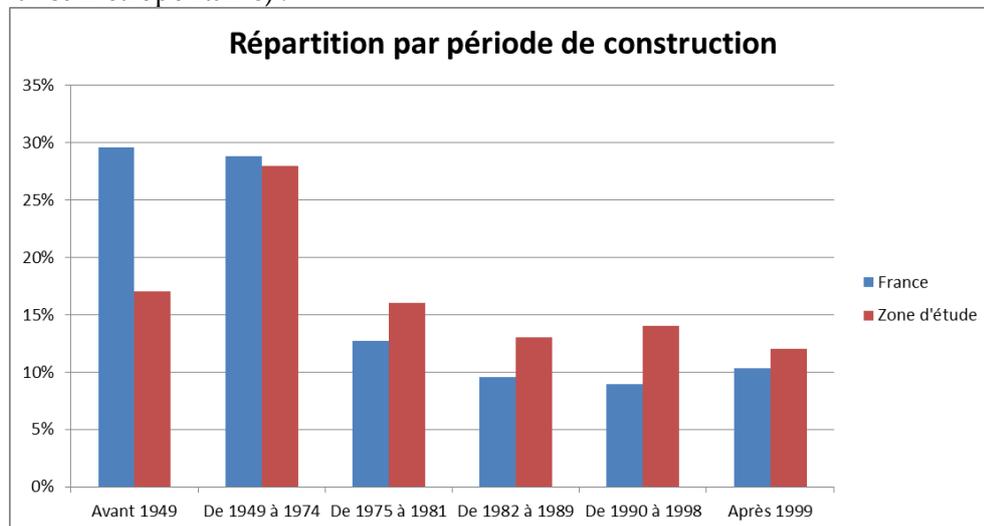
**Figure 8 : Répartition des bâtiments par période de construction**

Période de construction	Nombre de bâtiments	Part
Avant 1949	8 103	17%
De 1949 à 1974	13 581	28%
De 1975 à 1981	7 732	16%
De 1982 à 1989	6 024	13%
De 1990 à 1998	6 757	14%
En 1999 et plus	5 642	12%

### **Tableau 1 : Nombre de bâtiments par période de construction**

Le parc bâti de la zone d'étude est donc principalement composé de bâtiments datant d'avant 1981 (61% des bâtiments ont été construits avant cette date).

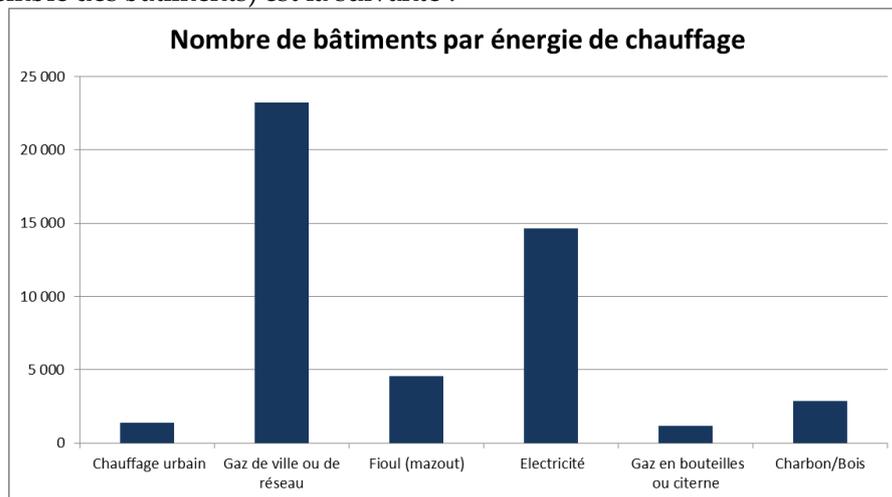
La zone d'étude se distingue par une proportion relativement faible de bâtiments construits avant 1974 comme l'illustre le graphique suivant (comparaison à la France métropolitaine) :



**Figure 9 : Répartition par période de construction (comparaison France métropolitaine)**

En effet, la proportion de constructions avant 1974 est de 58% pour la France alors qu'elle n'est que de 45% pour la zone d'étude. Nous avons donc à faire à un parc de logements légèrement plus récent que la moyenne française.

La répartition des bâtiments par énergie de chauffage (principalement utilisée dans l'ensemble des bâtiments) est la suivante :



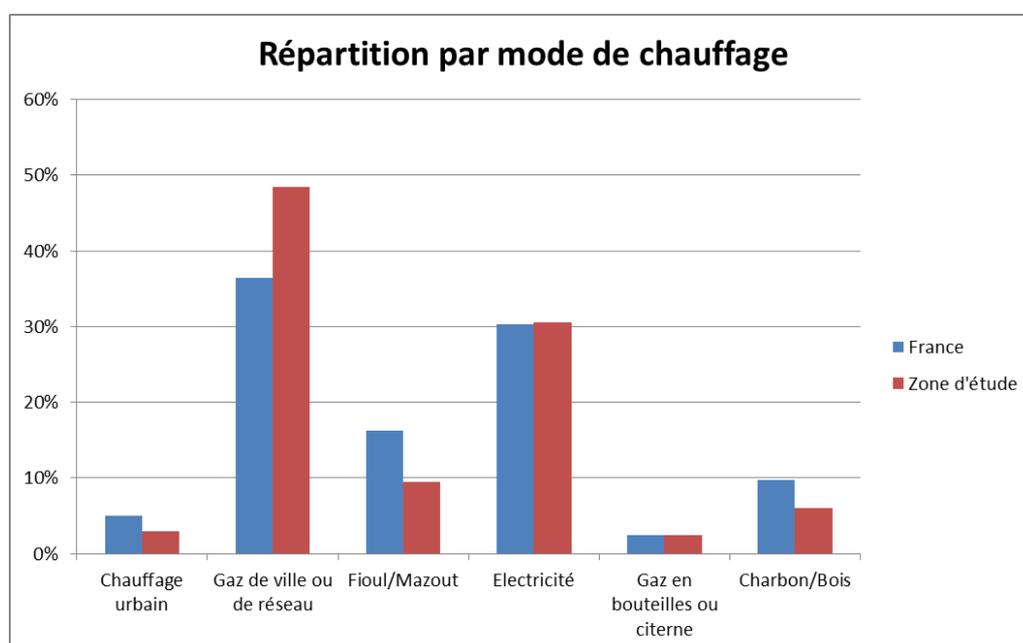
**Figure 10 : Répartition des bâtiments par énergie de chauffage**

Energie principale de chauffage	Nombre de bâtiments	Part
Chauffage urbain	1 391	2,9%
Gaz de ville ou de réseau	23 208	48,5%
Fioul (mazout)	4 563	9,5%
Electricité	14 657	30,6%
Gaz en bouteilles ou citerne	1 169	2,4%
Charbon/Bois	2 851	6,0%

**Tableau 2 : Nombre de bâtiments par énergie principale de chauffage**

L'énergie principalement utilisée pour le chauffage sur le territoire est le gaz de ville (près de 50% des bâtiments). L'énergie électrique est également très utilisée avec 30% des bâtiments concernés.

La zone d'étude se distingue par une proportion très importante de bâtiments utilisant le gaz comme source d'énergie pour le chauffage comme l'illustre le graphique suivant (comparaison à la France métropolitaine) :



**Figure 11 : Répartition par source d'énergie pour le chauffage (comparaison France métropolitaine)**

On remarque donc un recours au gaz bien plus important dans la zone d'étude par rapport à la France au détriment des trois sources d'énergie suivante : le chauffage urbain, le fioul et les charbon/bois.

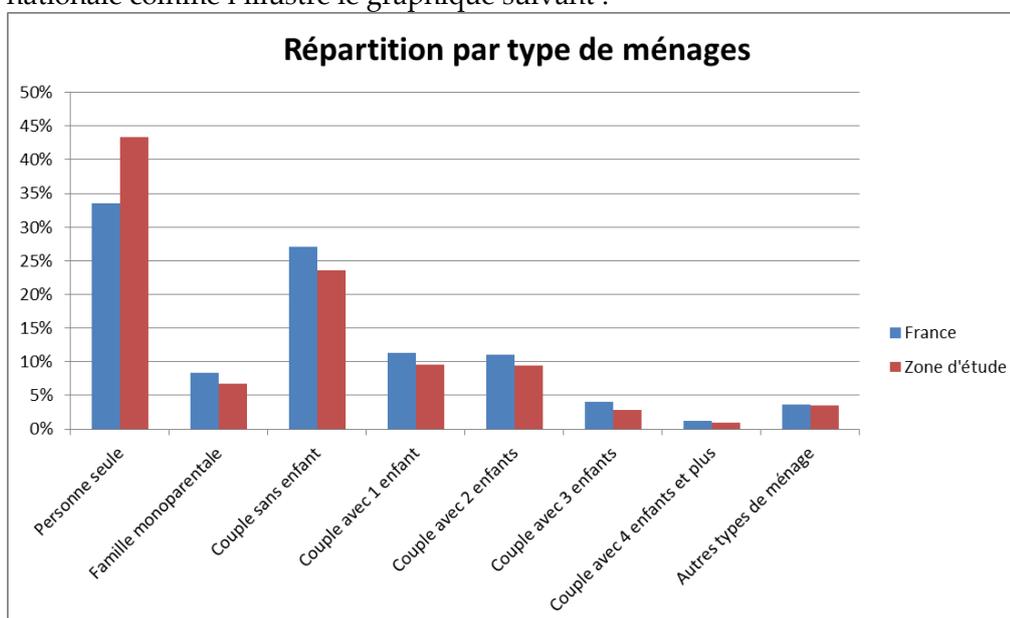
### ► La typologie des ménages

Les 47 839 bâtiments sont composés de 144 675 logements. Ces logements sont occupés par différents profils de ménages suivant la répartition suivante (reconstituée selon la méthode II.2.c) :

Personne seule	62 791
Famille monoparentale	9 834
Couple sans enfant	34 050
Couple avec 1 enfant	13 749
Couple avec 2 enfants	13 728
Couple avec 3 enfants	4 110
Couple avec 4 enfants et plus	1 400
Autres types de ménage	5 013

**Tableau 3 : Nombre de ménages par profil**

On remarque que presque 70% de la population est composée de personne seule ou de couples sans enfant. Cela diffère un peu à l'échelle de la France métropolitaine car ces groupes de ménages ne représentent plus que 60% des ménages à l'échelle nationale comme l'illustre le graphique suivant :



**Figure 12 : Répartition par type de ménage (comparaison France métropolitaine)**

► **La typologie des usages selon le modèle CHARTER®**

La liste des usages reconstitués par le modèle CHARTER® est la suivante :

Type d'usage	Usage
<b>Produits blancs</b>	Sèche-Linge Lave-Vaisselle Lave-Linge
<b>Froid</b>	Combiné Réfrigérateur Congélateur
<b>Cuisson concurrentielle</b>	Cuisinière Four Tables de cuisson
<b>Produits bruns</b>	Chaîne HIFI

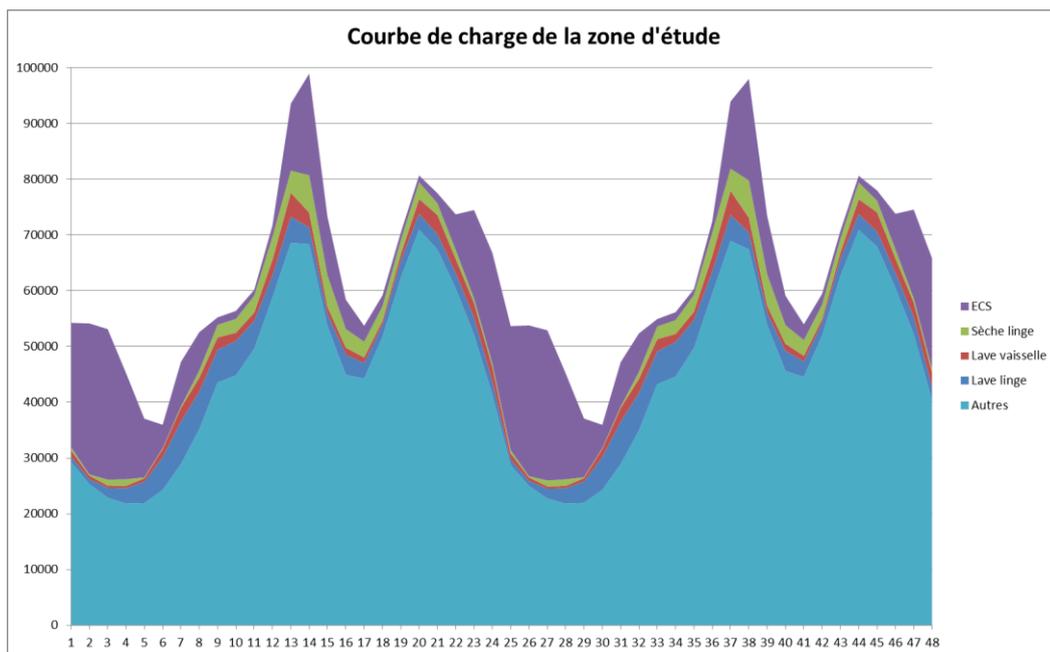
	Téléviseur Décodeur Console de Jeux Lecteur DVD
<b>Produits gris</b>	Box Ordinateur fixe Ordinateur portable Imprimante Modem
<b>Cuisson spécifique</b>	Micro-Onde Cafetière Bouilloire Friteuse Grille-Pain Hotte Minifour
<b>Nettoyage</b>	Aspirateur Fer à repasser Centrale vapeur
<b>Autres</b>	Eclairage Auxiliaires Ventilation Refroidissement Piscines Individuelles

**Tableau 4 : Liste des usages modélisés au sein de l'outil CHARTER®**

Pour chacun des usages de cette liste, CHARTER® modélise une consommation unitaire (en kWh/an/ménage) pour chacun des types de ménages définis. Cette consommation est par la suite « horo-saisonnalisée » afin de construire une courbe de charge horaire pour une année type pour chacun de ces usages.

► **La structure de la demande horo-saisonnaire simulée par le modèle Charter**

La méthodologie présentée dans la partie II permet de reconstituer la courbe de charge des consommations électriques (hors chauffage) sur la zone d'étude. Voici un exemple de la courbe de charge pour 48h : le nombre d'usages affichés a volontairement été limité par souci de lisibilité.

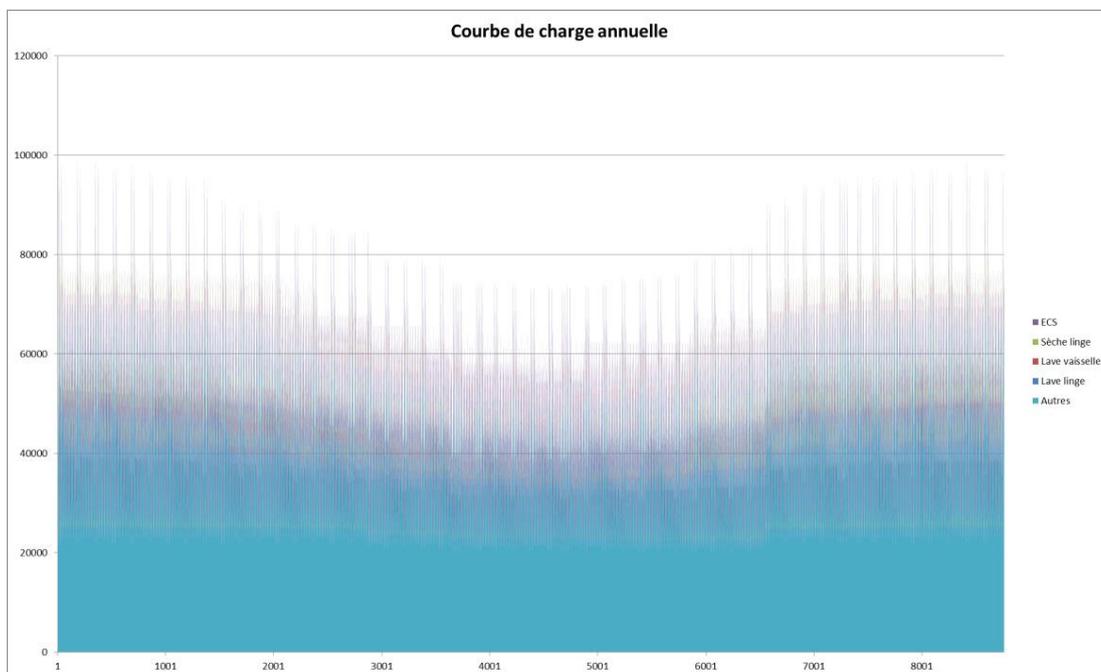


**Figure 13 : Courbe de charge pour les 48 premières heures de l'année**

On observe de grandes différences entre les différentes heures de la journée avec un pic très net entre 12h et 14h. Par ailleurs il est possible d'observer que l'ECS consomme principalement durant les heures creuses la nuit (aplat violet).

Cependant, ce graphique ne rend pas compte des différences qui existent entre les saisons.

En effet, le modèle CHARTER® reproduit la saisonnalité des consommations comme l'illustre le graphique suivant : les consommations chutent en été et on observe des pics de consommations d'électricité spécifique durant les week-ends.



**Figure 14 : Courbe de charge annuelle du territoire considéré dans TOASTER**

La consommation d'électricité hors chauffage reconstituée est de 471 GWh sur l'année.

Sur ces graphiques ont été distingués 4 usages : **le lave-linge, le sèche-linge, le lave-vaisselle et l'ECS**. Les autres usages, qui concentrent la majorité des consommations sont regroupés dans la catégorie « Autres ».

Les 4 usages qui ont été distingués sont ceux qui seront « effaçables » dans la suite du document. Ceux-ci représentent 27% de la consommation d'électricité spécifique totale sur l'année.

Il est d'ores et déjà possible de dire que les marges de manœuvre d'effacement seront limitées étant donné la faible proportion des consommations sur laquelle il est possible de jouer.

De plus, étant donné la composition en termes de typologie de ménages de la zone de d'études (prépondérance de personnes seules et de couples sans enfant), les consommations unitaires (de chacun des ménages) sur lesquelles il sera possible de jouer seront réduites.

## III. Les gisements locaux de l'effacement

### III.1.a. Les gisements d'effacement de l'échelle du bâtiment à l'échelle urbaine

Dans cette partie seront présentés les résultats des simulations de modulation de consommation qui ont été réalisées.

L'ensemble des simulations testées est décrit dans le tableau suivant :

Scénario	Courbe objective	Mailles spatiales
1	Courbe "tunnel"	Zone complète
2	Production solaire	Zone complète, découpages en 3, 12 et 234 agrégats urbains
3	Production éolienne	Zone complète, découpages en 3, 12 et 234 agrégats urbains
4	Production solaire + éolienne	Zone complète, découpages en 3, 12 et 234 agrégats urbains

**Tableau 5 : Liste des scénarii testés**

Dans chaque scénario, les résultats sont présentés pour chaque maille spatiale et agrégés à l'échelle globale pour permettre une comparaison entre les différentes modulations opérées aux différentes échelles.

Dans tous les scénarii, les usages effaçables sont les 4 suivants : lave-linge, sèche-linge, lave-vaisselle et ECS. Ceux-ci représentent 27% de la consommation d'électricité hors chauffage sur l'ensemble de la zone d'étude.

Dans tous les scénarii, l'algorithme de modulation (présenté en annexe 3) a pour but de minimiser la « distance » entre la courbe de charge de la zone et la courbe objective choisie.

Selon le scénario, des indicateurs spécifiques sont calculés afin d'aider le lecteur à la compréhension des enjeux de la modulation de la consommation par l'effacement.

L'ensemble de ces scénarios représentent 13 simulations qui ont été réalisées avec le même nombre d'itérations afin de ne pas fausser les résultats.

► **Selon un scénario d'évitement systématique des pointes journalières (scénario 1)**

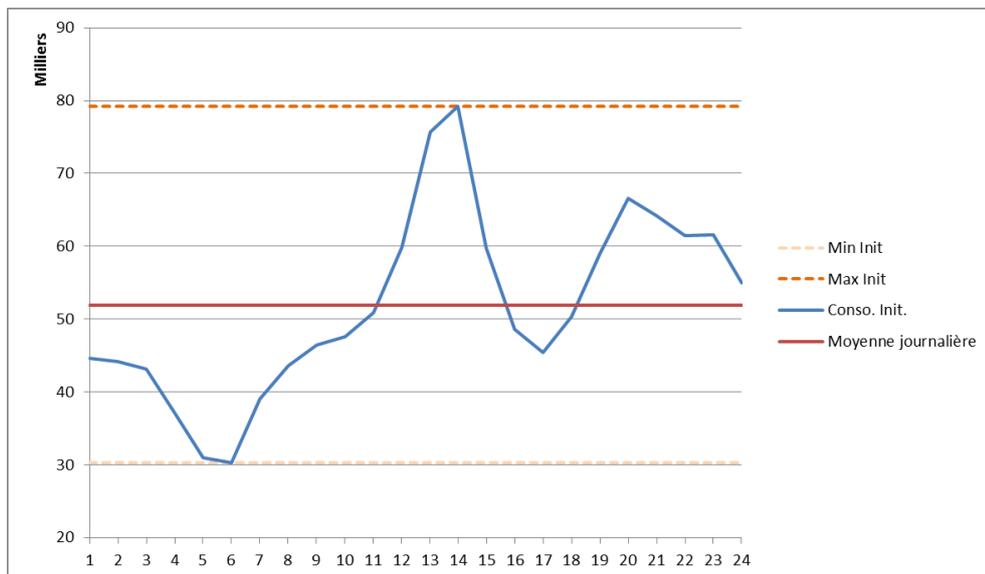
Dans cas, les calculs ont été réalisés sur l'échelle de la zone d'étude complète.

Ce scénario d'évitement systématique des pointes journalières correspond à un certain type de courbe objective. Le but étant de lisser les pointes journalières, la courbe objective qui a été retenue est une courbe « tunnel ».

Il s'agit d'une fonction qui permet de « couper » les extrema de consommations tous les jours.

Pour construire cette fonction à n'importe quelle maille, il suffit de considérer les consommations d'électricité horaires de l'ensemble des ménages habitant la maille géographique. A partir de cette courbe de charge est calculée la moyenne journalière des consommations. A cette moyenne journalière est ajoutée ou ôtée une proportion des pics de consommations (pics positifs ou négatifs) : cette proportion a été fixée à 60% dans ce scénario pour obtenir une réduction significative des pointes.

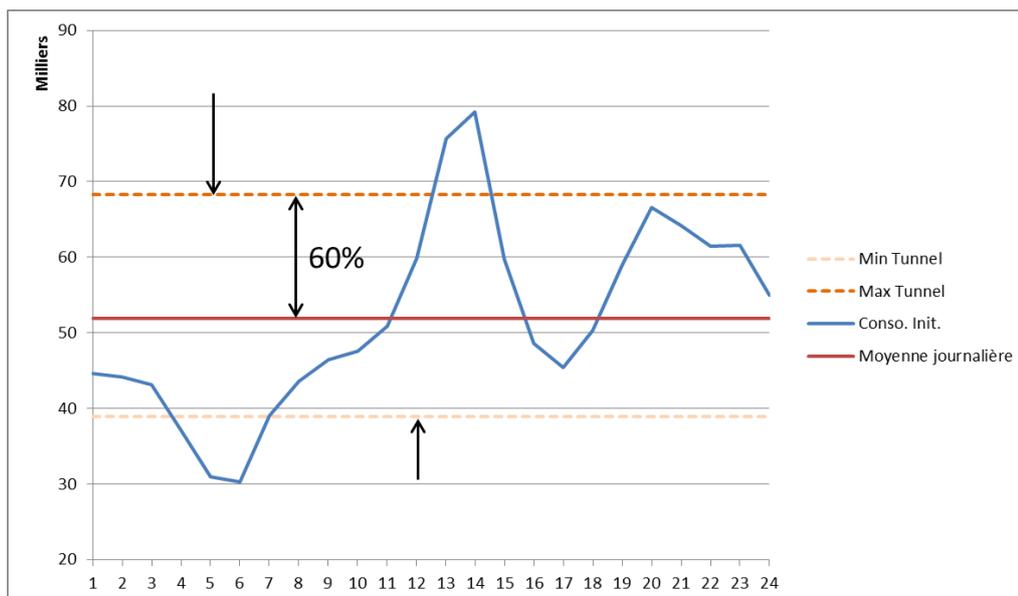
Le schéma suivant permet d'expliquer la construction de la courbe « tunnel » :



**Figure 15 : Construction de la courbe « tunnel » (1/3)**

La courbe bleue correspond à la courbe de charge pour 24 heures consécutives du territoire. En rouge figure la moyenne sur la journée de ces consommations.

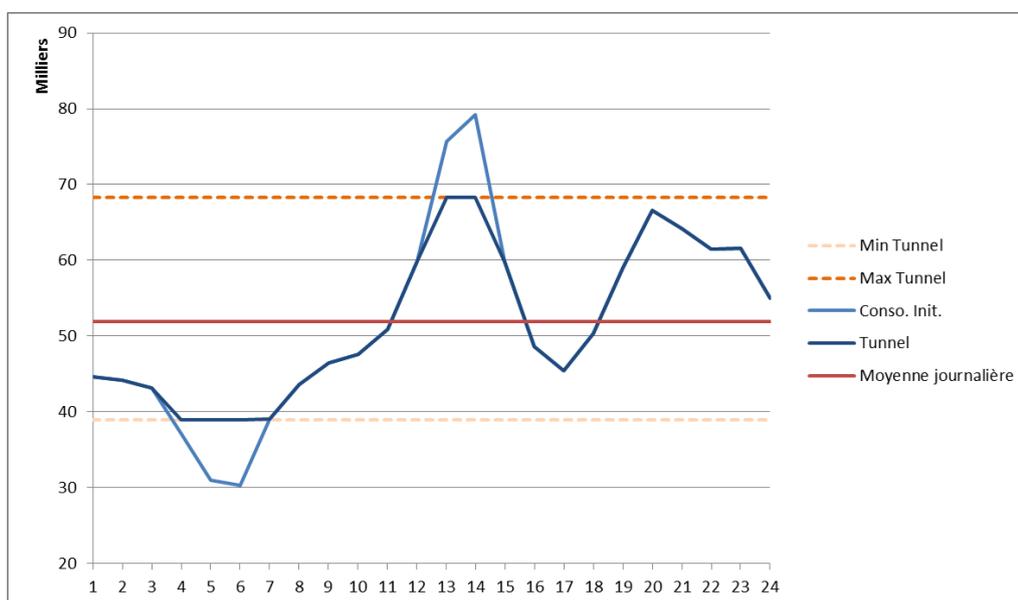
Les courbes en pointillés correspondent au minimum et au maximum de la courbe de charge sur la journée.



**Figure 16 : Construction de la courbe « tunnel » (2/3)**

Sur cette figure est représenté le tunnel formé par une proportion de l'écart entre les extrema et la moyenne journalière : ici, nous avons choisi une valeur de 60% ce qui permet de « couper » de manière assez nette les extrema de la journée.

La véritable courbe objective correspond enfin à la courbe de charge initiale bornée par les extrema du tunnel :



**Figure 17 : Construction de la courbe « tunnel » (3/3)**

La courbe objective qui est finalement utilisée est donc la courbe en bleu foncé. Cette courbe permet donc de limiter la pointe journalière tout en ne changeant pas en profondeur la structure de consommation au sein d'une journée (seulement 4 heures de la journée sont fortement impactées). Il est à noter que la limitation des pics négatifs (entre 5h et 6h sur la figure précédente) permettra de sur consommer à ces heures (a priori, le report de consommation engendré par l'effacement devra se faire principalement durant ces heures).

Ce scénario a été testé sur la zone d'étude complète.

Tout d'abord le seuil de 60% des extrema fait ressortir 2 périodes pendant lesquelles il y a des maxima de consommations : entre 13h et 14h et de 20h à 23h. Cela correspond bien à ce qui était attendu en terme de pointe électrique journalière.

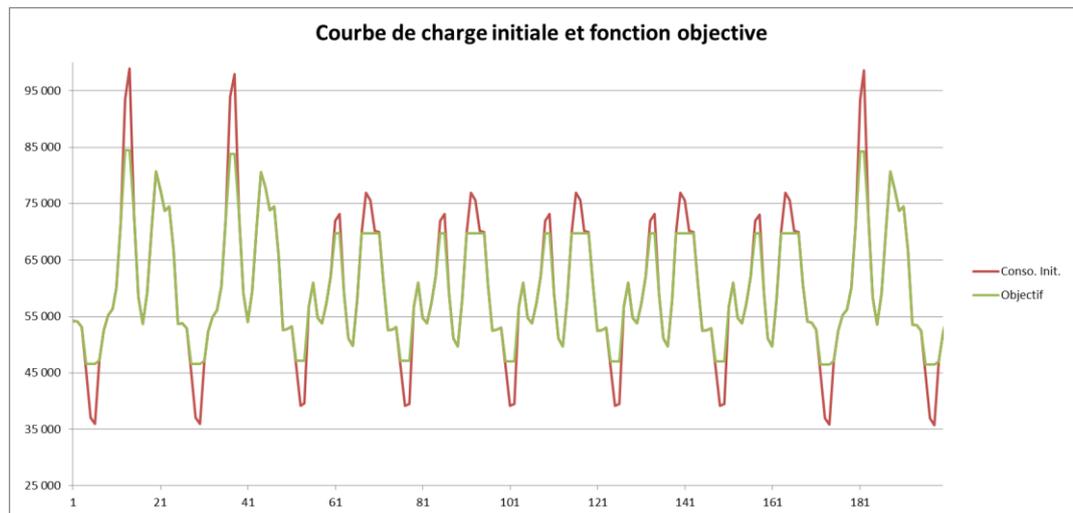
A l'inverse, les heures de la journée pendant lesquelles sont observés les minima de consommation électrique sont comprises entre 4h et 7h du matin, ce qui paraît également cohérent.

Le principe de l'effacement va donc être de décaler des usages ayant lieu en mi-journée et fin de journée en fin de nuit afin de coller au maximum à la courbe objective (de fait, les consommations de la mi-journée seront réduites et celles de la nuit seront augmentées).

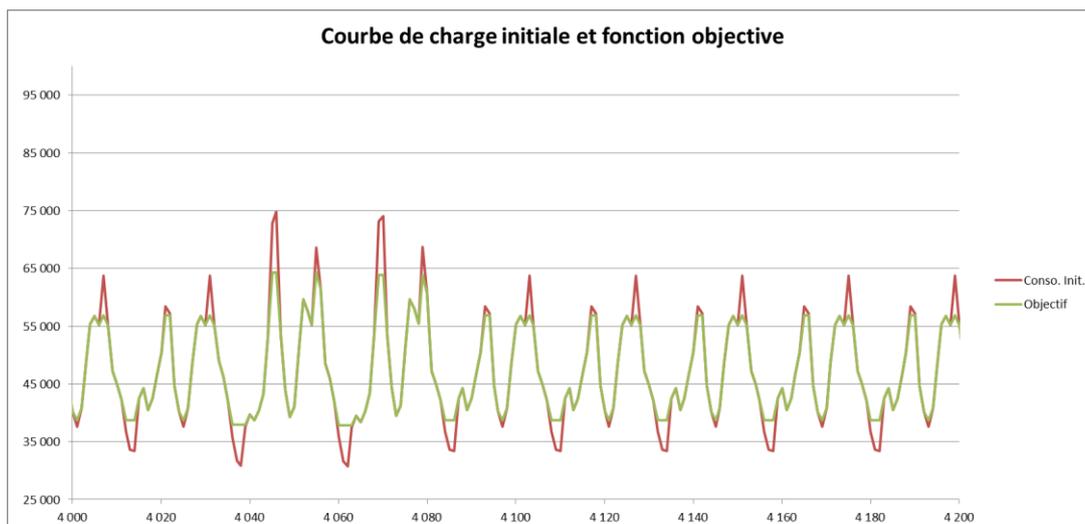
La courbe de charge du territoire a donc été reconstituée ainsi que la courbe « tunnel » associée (avec un paramètre de 60%) selon la méthode présentée ci-dessus, pour les 8760 heures qui composent l'année type.

Les deux graphiques ci-dessous présentent la courbe de charge reconstituée pour le territoire (courbe rouge) et la courbe « tunnel » (courbe verte) pour les 200 premières heures de l'année (hiver) et pour 200 heures en milieu d'année (été).

L'unité des ordonnées de ces graphiques est le kWh.



**Figure 18 : Courbe de charge et courbe « tunnel » pour les 200 premières heures de l'année**

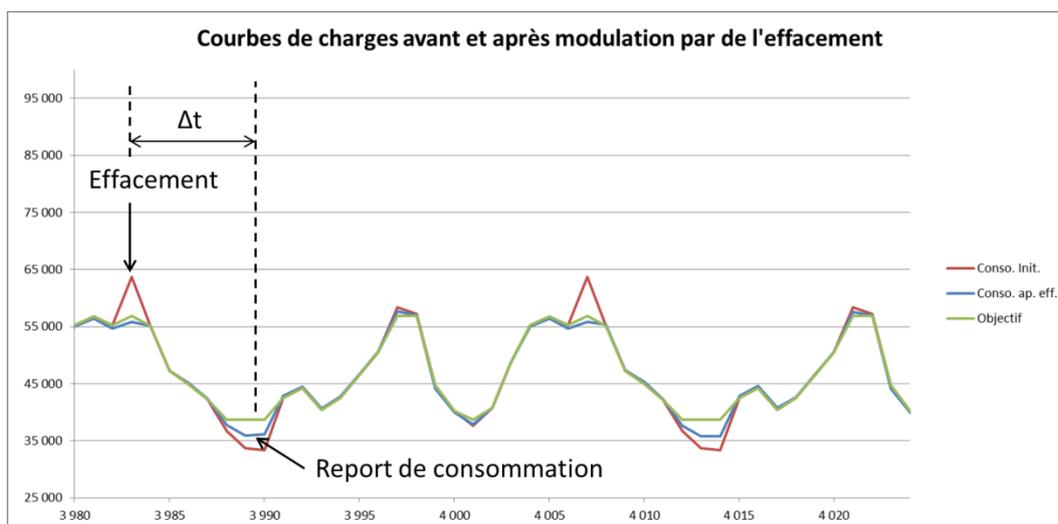


**Figure 19 : Courbe de charge et courbe « tunnel » pour 200 heures en milieu d'année**

Comme cela avait été remarqué en III.1.a, les consommations sont moins élevées en été. Les pics sont également moins marqués et il est intuitif d'imaginer que l'effacement sera plus efficace durant l'été étant donné les usages qui sont effaçables dans ce scénario (a minima, les consommations dues au lave-linge, lave-vaisselle ne sont a priori pas climato-dépendantes).

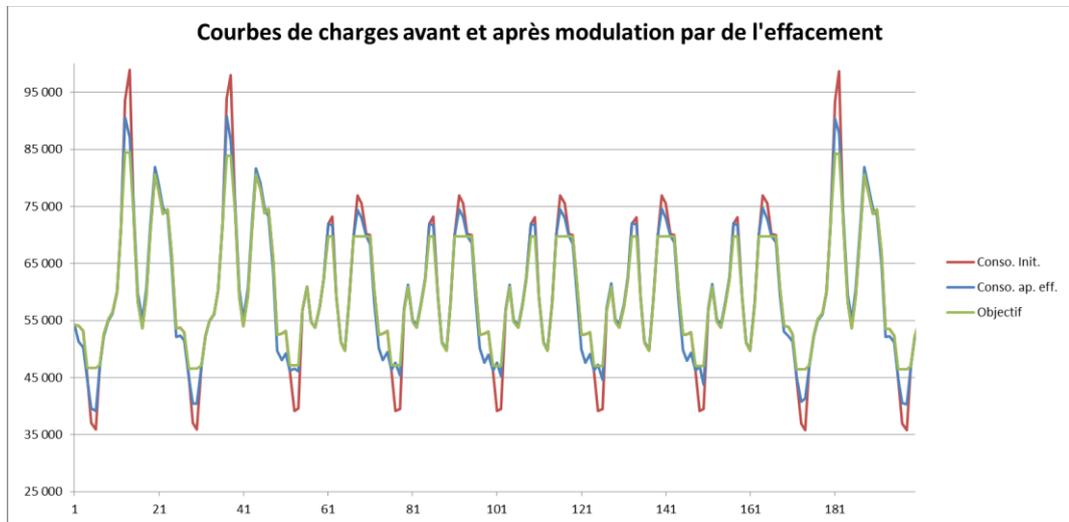
Le programme d'optimisation des effacements décrit en annexe 3 a été appliqué sur la zone d'étude complète.

Sur l'exemple suivant issu du résultat de la procédure est indiqué comment fonctionne en pratique le programme d'effacement (la courbe bleue représente les consommations après modulation) : en début de période sur le graphique, la consommation après modulation ne fait pas de pic comme la consommation initiale (c'est le moment de l'effacement). Quelques heures plus tard ( $\Delta t \sim 7$  heures plus tard), le report de consommation a lieu et la consommation après modulation est au-dessus de la consommation initiale (on limite également les périodes de minimum de consommation) :

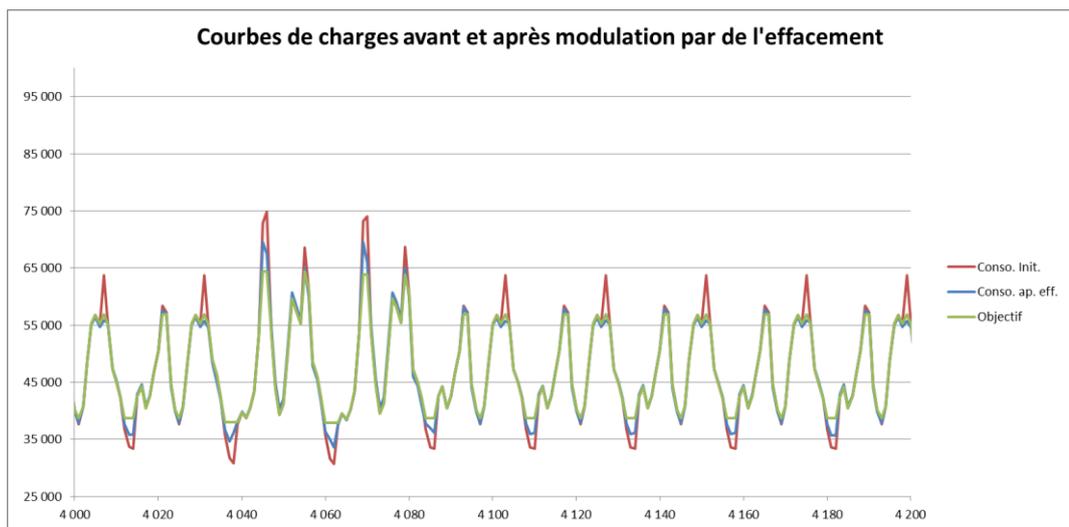


**Figure 20 : Fonctionnement du programme d'effacement**

Les graphiques suivants présentent, pour les mêmes tranches de 200 heures précédentes, la courbe de charge obtenue après modulation des 4 usages effaçables. La courbe bleue représente toujours la courbe de charge après modulation.



**Figure 21 : Courbe de charge après modulation pour les 200 premières heures de l'année**



**Figure 22 : Courbe de charge après modulation pour 200 heures en milieu d'année**

Comme cela avait été pressenti, il apparait que l'effacement est plus efficace durant l'été (deuxième graphique) : la courbe bleue semble effectivement plus proche de l'objectif durant cette période.

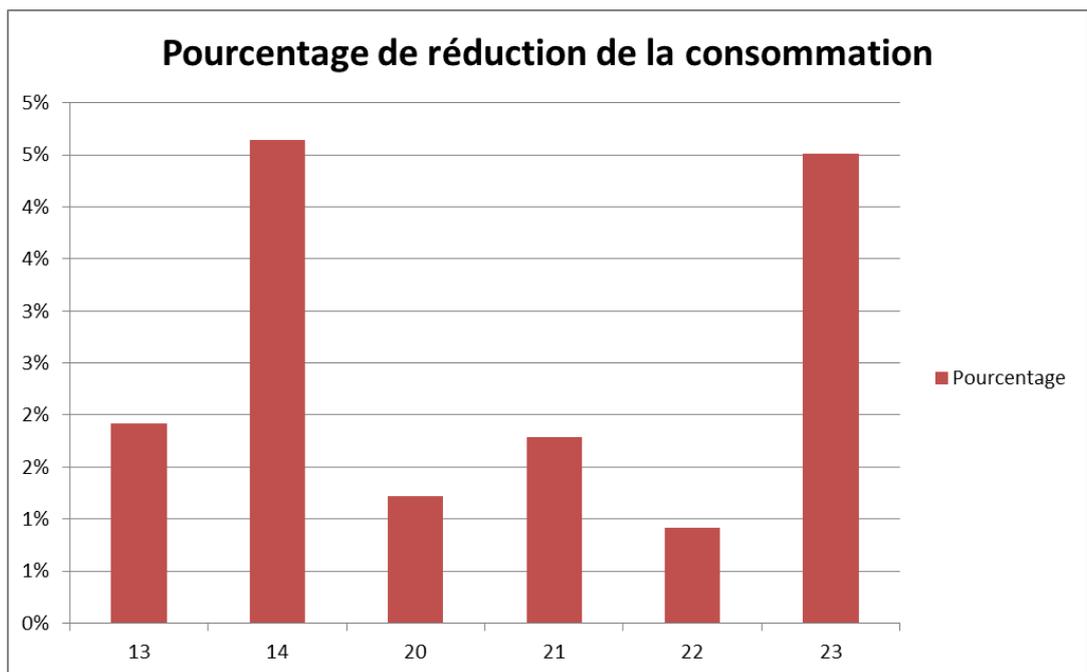
L'indicateur d'efficacité de l'effacement (voir II.1.a) mesuré sur ces courbes (avant et après modulation) donne un résultat de 0.67. L'effacement est donc plutôt efficace (valeur proche de 1) sur l'année type.

Il est également possible de temporaliser cet indicateur (on le calcule pour certains mois de l'année uniquement) pour confirmer l'intuition d'un effacement plus efficace durant l'été. L'indicateur calculé sur les mois de Mai à Septembre inclus donne une valeur de 0.74. Sur les autres mois de l'année, on obtient une valeur de

0.64. Ainsi, cela confirme l'hypothèse d'un effacement plus efficace durant les mois d'été (la valeur 0.74 pendant l'été est plus proche de 1 que la valeur 0.64 pendant l'hiver).

Outre l'indicateur d'efficacité de l'effacement (i.e. sa capacité à moduler la courbe de charge initiale pour coller à l'objectif), il s'agit maintenant de s'intéresser à la réduction des pointes de consommations électriques : parvient-on à limiter les consommations lors des heures les plus critiques ?

Les réductions moyennes ont été calculées sur les heures de pointes identifiées (13h-14h et de 20h à 23h) : les taux de réductions de pointes varient selon l'heure comme l'indique le graphique suivant.



**Figure 23 : Pourcentage de réduction de la consommation aux heures de pointes identifiées (13h-14h et de 20h à 23h)**

Le programme d'effacement permet donc de réduire les consommations aux heures de pointes de 0.9% à 4.6% en moyenne. Sur certaines heures de l'année, la limitation de la pointe peut atteindre 13% des consommations. Si ces réductions semblent relativement faibles, elles ont lieu à des périodes critiques pour le réseau électrique et peuvent avoir une utilité importante pour la stabilité de celui-ci.

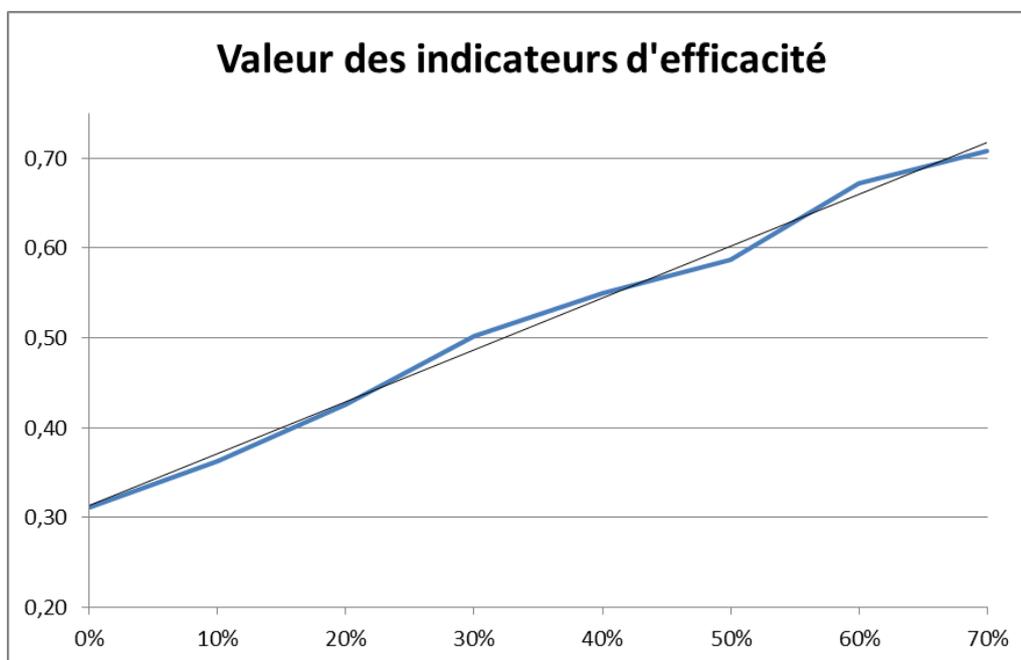
D'autres tests ont été réalisés avec des valeurs de paramètres comprises entre 0% et 70% (dans le premier cas, la courbe objective est donc égale à la moyenne journalière des consommations et on essaye de lisser complètement la courbe de charge chaque jour).

Les résultats sont décrits dans le tableau ci-dessous :

Paramètre de la courbe "tunnel"	Indicateur d'efficacité annuel	Indicateur d'efficacité Mai-Septembre	Indicateur d'efficacité Octobre-Avril
0%	0,31	0,34	0,3
10%	0,36	0,39	0,35
20%	0,43	0,46	0,41
30%	0,5	0,54	0,48
40%	0,55	0,62	0,52
50%	0,59	0,65	0,56
<b>60%</b>	<b>0,67</b>	<b>0,74</b>	<b>0,64</b>
70%	0,71	0,74	0,69

**Tableau 6 : Valeurs de l'indicateur d'efficacité selon le paramètre de la courbe tunnel**

Le graphique associé est le suivant :



**Figure 24 : Valeurs de l'indicateur d'efficacité selon le paramètre de la courbe tunnel**

Ainsi, l'indicateur est croissant avec les valeurs du paramètres : plus le paramètre augmente, plus l'effacement est efficace (cela est logique puisque lorsque le paramètre augmente, la courbe objective se rapproche de la courbe initiale et est donc moins «contraignante»). La croissance de la courbe est quasi linéaire, ce qui indique que le modèle réagit de manière uniforme sur l'ensemble de ces courbes objectives.

Si on prolonge la courbe ci-dessus, on remarque que pour une valeur du paramètre de 100% (cas où la fonction objective est égale à la consommation initiale), l'indicateur tend vers 1 (valeur non atteinte étant donné le dénominateur de la formule de calcul de l'indicateur d'efficacité qui est nul dans ce cas mais cela correspond à un calage parfait entre les 3 courbes).

Il est également possible de s'intéresser à d'autres types de courbes objectives, indépendantes des consommations : par exemple, il est envisageable d'essayer de moduler la consommation électrique de manière à utiliser au mieux la production photovoltaïque ou éolienne locale.

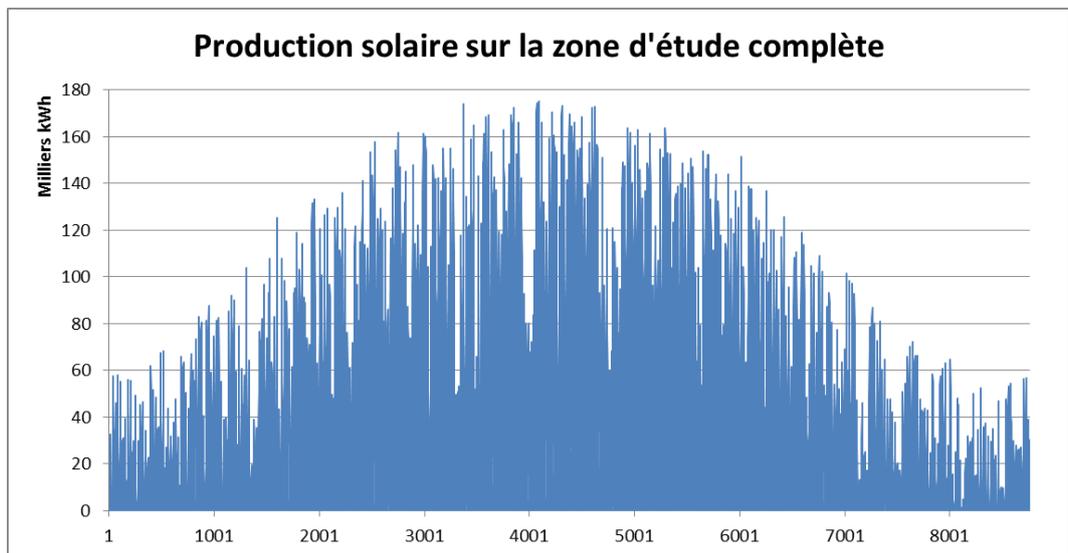
► **Selon un scénario de correspondance avec une production photovoltaïque des BEPOS (scénario 2)**

Dans ce cas, les calculs ont été réalisés sur l'échelle de la zone d'étude complète, des découpages en 3 agrégats, 12 agrégats et 234 agrégats urbains. Ainsi, nous avons accès à 4 niveaux de résultats pour ce scénario.

Pour chacun des bâtiments dans la zone a été calculée une longueur de façade pouvant être équipée de panneaux solaires avec un rendement moyen de 12% (ce sont les longueurs de façade exposées plus ou moins fortement au sud, entre -15° et +15° d'azimut par rapport au sud). Il a ensuite été choisi d'équiper la totalité de ces longueurs de façade éligibles, de manière à obtenir une production d'électricité photovoltaïque annuelle la plus proche possible des consommations d'électricité hors chauffage de la zone (450 km de façade éligibles sont équipées sur l'ensemble de la zone).

Il est bien entendu que ce scénario est très optimiste mais cela permet de fixer les idées sur un scénario extrême.

La courbe de production locale annuelle pour l'ensemble de la zone d'étude est donc la suivante :

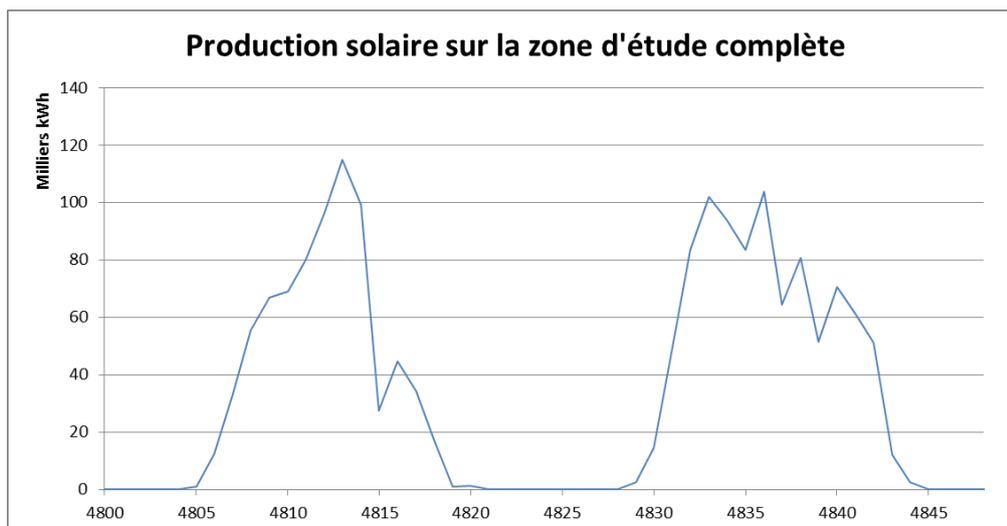


**Figure 25 : Production solaire annuelle de la zone d'étude**

La production totale est d'environ 240 GWh sur l'année avec une puissance de crête de 175 MW. Cette production annuelle représente environ 51% des consommations du territoire.

La production est beaucoup plus importante en été qu'en hiver et il est possible de dire dès à présent, au regard de la courbe de production, que la consommation sera très difficile à moduler pour cette courbe objective : les deux courbes sont en opposition de phase, les consommations chutant et la production étant plus forte durant l'été.

Au niveau journalier, on observe que la production nocturne est bien évidemment nulle et qu'il peut exister des différences importantes entre 2 jours consécutifs. En effet, la production photovoltaïque est très sensible, notamment aux passages nuageux. Le graphique suivant présente la production générée par le territoire pour 2 jours consécutifs en été :



**Figure 26 : Production solaire de la zone d'étude sur 2 jours d'été**

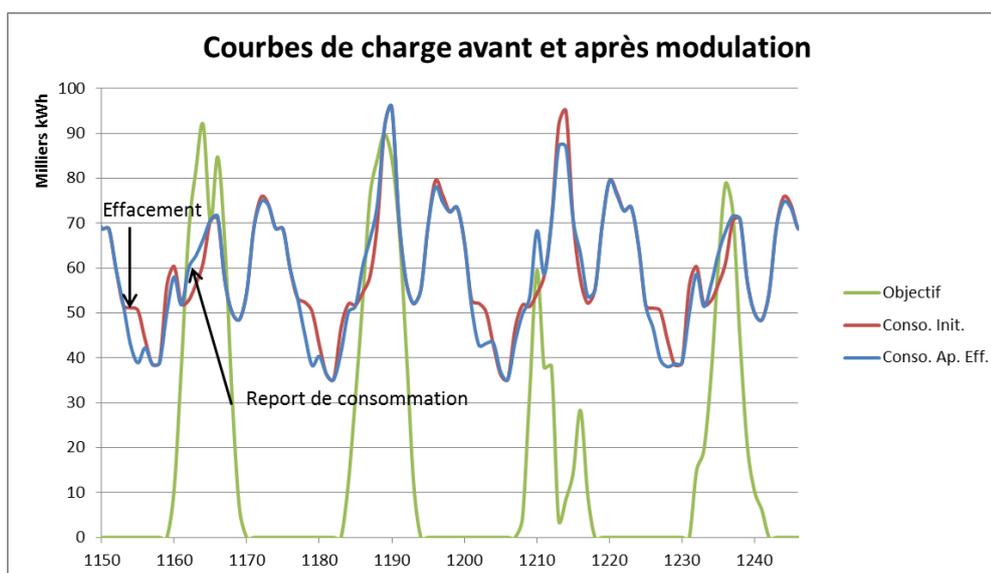
Il est d'ores et déjà possible d'affirmer que cette courbe objectif ne pourra pas être atteinte par de l'effacement : en effet, les usages effaçables ne représentent que 27% des consommations totales et il est donc impossible d'atteindre une consommation nulle de manière périodique pendant plusieurs heures.

Etant donnée la relativement faible étendue de la zone d'étude, il a été considéré que l'ensoleillement était uniforme sur l'ensemble de celle-ci : ainsi le foisonnement ne permettra pas d'obtenir des courbes objectives non nulles durant les heures de nuit.

Au regard des remarques précédentes, un indicateur d'efficacité faible est attendu. L'algorithme d'optimisation a donc été lancé sur l'ensemble des quatre découpages territoriaux.

Sur la zone d'étude complète, le résultat est un indicateur d'efficacité de 0,05. Cette valeur très faible correspond bien à ce qui était attendu.

En termes de courbes de charges le résultat est le suivant sur 4 jours consécutifs en hiver :



**Figure 27 : Courbes de charges avant et après modulation sur 4 jours d'hiver**

La courbe verte est la courbe de production photovoltaïque totale du territoire. La courbe rouge à la courbe de charge avant modulation et la courbe bleue correspond à la courbe de charge après modulation. On remarque que l’effacement a lieu la nuit (pour baisser les consommations au maximum) et le report de consommation engendré a lieu durant le pic de production. La principale source de réduction des consommations par effacement durant les heures de nuit est la production d’eau chaude sanitaire (les consommations électriques nocturnes dues à l’utilisation de lave-linge, lave-vaisselle et sèche-linge sont en effet faibles) donc il n’est possible de jouer qu’avec une partie des 27% de consommations totales. Ce phénomène est donc en partie responsable de la faible valeur de l’indicateur d’efficacité.

Cet indicateur n’a pas la même valeur tout au long de l’année type, il vaut 0,058 pendant l’été (de mai à septembre) et 0,044 durant l’hiver (octobre à avril).

Dans le cas d’une courbe objective égale à la production photovoltaïque d’électricité, l’indicateur d’efficacité n’est peut-être pas le plus pertinent puisqu’il s’agit essentiellement de mesurer la production d’électricité fatale qui est effectivement consommée localement.

Afin de mesurer la part de la production qui est consommée, il suffit de regarder pour chaque heure de l’année la part de la production qui est consommée localement. L’idée de la modulation des consommations par l’effacement est en effet de consommer une part plus grande de la production locale.

Dans le cas de la consommation initiale, 64,1% de la production annuelle sont consommés localement. Cela représente 153,6 GWh. La modulation par l’effacement permet de consommer 2,2% supplémentaires et on atteint presque 157 GWh parmi les 240 GWh produits.

Il est également intéressant de regarder les variations inter saisonnières de cet indicateur : de mai à septembre la production d’électricité d’origine photovoltaïque est de 154 GWh soit 64,2% de la production annuelle. Durant cette période, respectivement 83 et 85 GWh sont consommés avant et après modulation par l’effacement (soit 54,1% et 55,4% de la production de cette période).

Durant l’hiver (d’octobre à avril), 85 GWh sont produits et respectivement 70,2 et 71,6 GWh sont consommés localement avant et après modulation. Cela représente respectivement 82% et 84% de la production de cette période. Ainsi, une grande majorité de la production réalisée est consommée durant la période hivernale.

Le tableau suivant récapitule ces informations :

Période	Indicateur d'efficacité	Production solaire (GWh)	Part consommée initiale	Part consommée après modulation
Année	0,05	239,7	64,1%	65,5%
Mai-Septembre	0,058	154,1	54,1%	55,4%
Octobre-Avril	0,044	85,6	82,1%	83,6%

**Tableau 7 : Résultats de l’effacement sur la zone d’étude**

Il est maintenant intéressant de regarder les résultats de la modulation de la consommation pour chacun des 3 découpages proposés : 3, 12 et 234 agrégats urbains. Ces agrégats diffèrent par les consommations engendrées par leurs habitants (il n’y a pas le même nombre de bâtiments et de ménages dans ces zones) et par la production qu’elles génèrent (les longueurs de façades éligibles sont également différentes, selon les orientations des bâtiments).

Les résultats seront étudiés de plusieurs manières : nous regarderons le résultat de l’effacement à l’échelle de chacune des agrégats identifiés et le résultat de la modulation sur la zone complète (par agrégation des zones découpées). On s’attend a priori à des résultats similaires entre la zone d’étude complète et l’agrégation des zones découpées (la production solaire et les consommations sont additives) mais avec des indicateurs d’efficacité plus faibles dans le deuxième cas (les contraintes sont alors plus importantes puisqu’il s’agit de s’approcher de la courbe de production à l’échelle de chacun des agrégats).

Les résultats sont les suivants pour chacune des 3 zones identifiées dans le premier découpage en agrégats urbains (les zones définies sont classées par ordre de densité décroissante) :

	Période	Indicateur d'efficacité	Production solaire (GWh)	Part consommée initiale	Part consommée après modulation
Zone 1	Année	0,045	94,6	56,4%	57,6%
	Mai-Septembre	0,045	60,8	46,1%	47,1%
	Octobre-Avril	0,046	33,8	74,9%	76,5%
Zone 2	Année	0,044	60,5	52,0%	53,1%
	Mai-Septembre	0,039	38,9	41,7%	42,5%
	Octobre-Avril	0,050	21,6	70,5%	72,2%
Zone 3	Année	0,047	84,7	77,4%	79,1%
	Mai-Septembre	0,072	54,4	69,4%	71,3%
	Octobre-Avril	0,036	30,3	91,9%	93,1%

**Tableau 8 : Résultats de l’effacement sur le découpage en 3 zones**

On obtient donc des résultats sensiblement similaires à ceux obtenus pour la zone d’étude complète : l’indicateur d’efficacité est du même ordre de grandeur (~0,045) et la production d’électricité d’origine photovoltaïque semble bien répartie entre les zones.

La part de la production d’électricité consommée localement diffère fortement selon les agrégats. Les deux premiers agrégats sont en effet à dissocier de la troisième : celles-ci consomment un peu plus de 50% de la production locale tandis que la dernière consomme 77% de la production.

La carte suivante présente ces résultats de part de production consommée localement avant modulation (on compare ici à la consommation avant modulation : en rouge l’agrégat 1, en noir l’agrégat 2 et en blanc l’agrégat 3).



**Figure 28 : Part de la production locale d'électricité consommée avant modulation (3 agrégats)**

La procédure d'effacement permet d'améliorer cette part de consommation locale pour la totalité des zones d'environ 2,1%.

La carte de cette amélioration est la suivante :



**Figure 29 : Augmentation de la part de la production locale d'électricité consommée après modulation (3 agrégats)**

L'augmentation la plus forte a lieu sur l'agrégat 2 là où la part initiale était la plus faible. Néanmoins, cela est à relativiser étant donné que les valeurs sont très proches et le gain engendré par l'effacement semble à peu près uniforme sur les 3 agrégats.

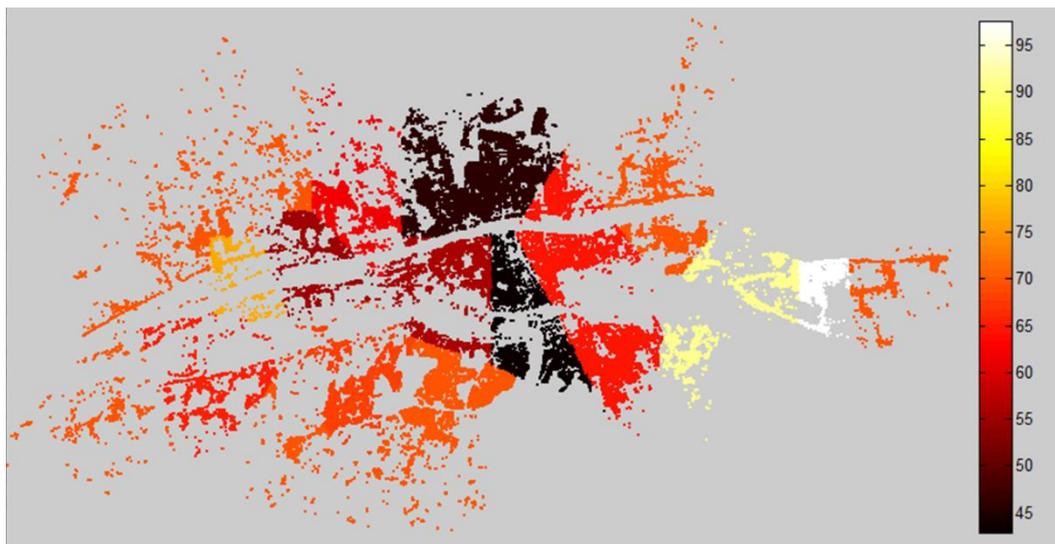
Si on compare maintenant les résultats générés par une optimisation de l'effacement sur les 3 agrégats à l'échelle de la zone globale, les résultats sont très proches de ceux obtenus lors de l'optimisation sur la zone globale.

En effet, l'indicateur d'efficacité global obtenu est de 0,05 (valeur identique à celle obtenue précédemment) et la part de la production consommée localement similaire (-0.01% par rapport à l'optimisation réalisée sur la zone globale). Ainsi, dans le cas d'un découpage en 3 agrégats, les résultats à l'échelle globale sont équivalents à ceux obtenus précédemment alors que des contraintes ont été rajoutées (l'optimisation a lieu sur les 3 agrégats et non plus uniquement sur la zone complète).

Pour les découpages en agrégats urbain suivants (12 et 234 zones), les résultats ne seront pas présentés entièrement pour des raisons évidentes de lisibilité. Des fourchettes de résultats, cartes et résultats à l'échelle globale seront fournis.

Dans le cas d'un découpage en 12 agrégats, les indicateurs d'efficacité varient entre 0,031 et 0,053. La part de la production consommée localement avant modulation varie entre 42,9% à 97,6% tandis que la part après modulation varie entre 43,7% et 98,5%.

La carte suivante présente ces résultats de part de production consommée localement avant modulation :



**Figure 30 : Part de la production locale d'électricité consommée avant modulation (12 agrégats)**

On retrouve les résultats précédents (sur 3 agrégats) avec une part de consommation faible dans le centre de la zone (ville de Tours). L'agrégat consommant le plus la production qu'elle génère se situe à l'est de la zone (en blanc).

L'augmentation d'utilisation de la production locale au moyen de la modulation varie entre 0.8% et 2.3%. Celle-ci est présentée sur la carte suivante :



**Figure 31 : Augmentation de la part de la production locale d'électricité consommée après modulation (12 agrégats)**

Il apparaît que l'augmentation la plus faible a lieu sur l'agrégat qui consommait initialement le plus la production locale qu'elle génère (à l'est de la zone, en noir). Les résultats de cette simulation sur 12 agrégats sont assemblés à l'échelle globale et les résultats sont là encore du même acabit que ceux de la simulation initiale : l'indicateur d'efficacité est de 0,049 et une production consommée localement en baisse de 0.05%.

Ainsi les résultats sont encore tout à fait similaires à ceux produits dans la première simulation.

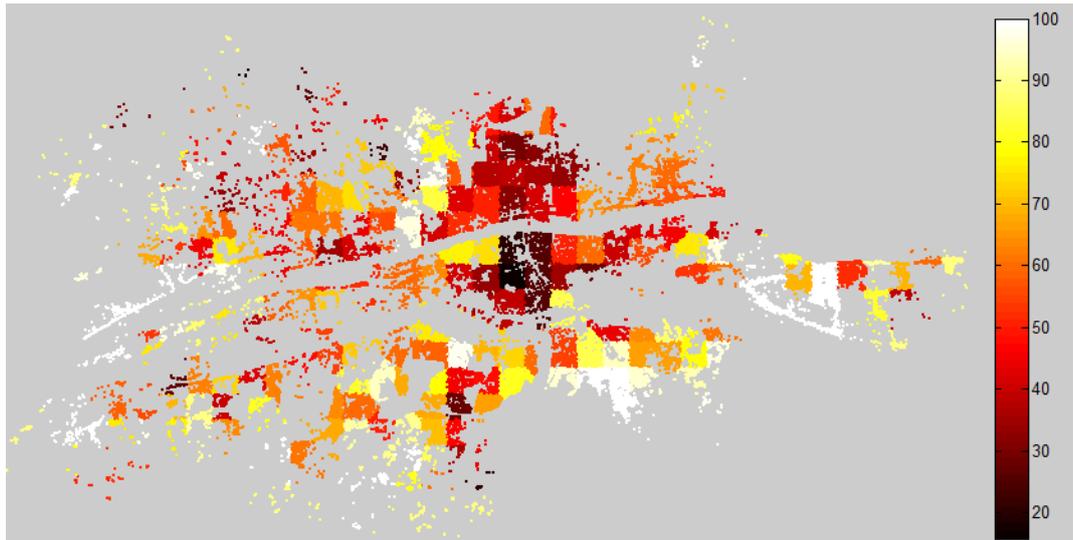
Le dernier découpage qui a été testé est le plus fin : 234 agrégats urbains ont été distingués.

Les indicateurs d'efficacité varient entre 0,0044 et 0,0567.

La part de la production consommée localement avant modulation varie selon les zones entre 15,9% et 100% tandis que la part après modulation varie entre 16% et 100%.

A cette échelle de découpage apparaissent pour la première fois des agrégats qui, avant même une modulation, consomment entièrement la production photovoltaïque qu'elles génèrent (19 agrégats sont dans ce cas avant modulation, 23 après modulation soit 1/10<sup>ème</sup> des agrégats définis).

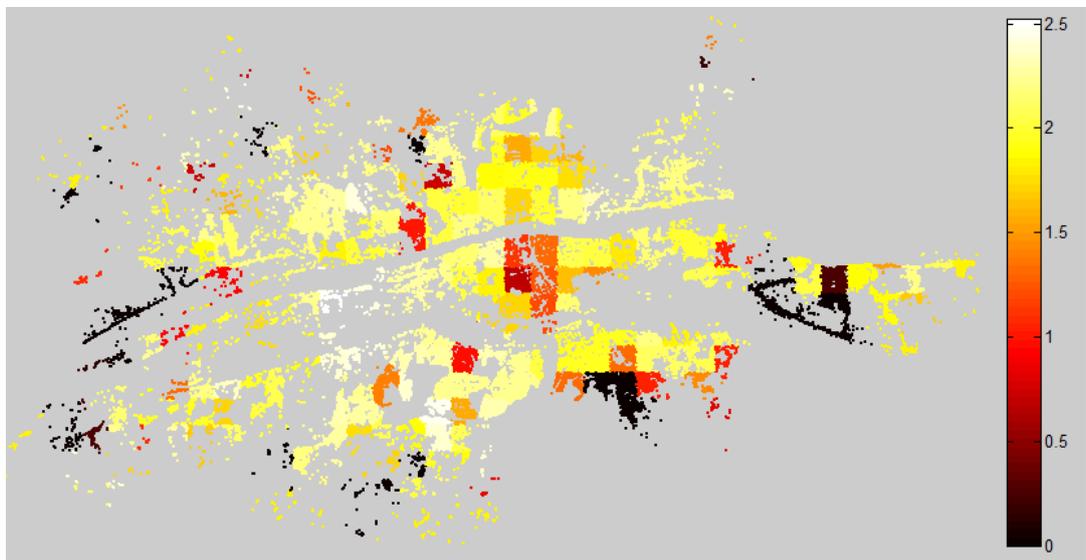
Ces données sont présentées dans les cartes suivantes :



**Figure 32 : Part de la production locale d'électricité consommée avant modulation (234 agrégats)**

On retrouve bien la ville de Tours qui, comme dans les simulations précédentes, consomme une part faible de la production réalisée sur le territoire. Cela est sûrement dû à une forte densité en façade éligibles et donc une production élevée. Par rapport aux simulations précédentes des nuances sont à apporter puisque des agrégats consommant une bonne part de leur production sont visibles à proximité des agrégats les plus denses.

L'augmentation de la consommation de la production locale grâce à la modulation par l'effacement est présentée dans la carte suivante :



**Figure 33 : Augmentation de la part de la production locale d'électricité consommée après modulation (234 agrégats)**

Là encore, les agrégats qui gagnent le plus sont ceux qui ne consommaient pas une part importante de leur production.

L'agrégation des résultats à l'échelle globale a été réalisée afin de pouvoir comparer cette simulation avec celle effectuée directement sur la zone complète. L'indicateur d'efficacité est alors de 0,046 et la production consommée localement après modulation chute de 0,3% ce qui reste négligeable.

L'analyse de ces résultats montre que la modulation des consommations par l'effacement des 4 usages retenus (lave-linge, lave-vaisselle, sèche-linge et ECS) permet d'augmenter sensiblement la consommation locale de la production d'électricité photovoltaïque. Cela permet notamment de limiter les réinjections dans le réseau de distribution.

L'étude montre que, quelle que soit la maille spatiale choisie (d'un découpage en 234 agrégats à la zone complète) l'effacement permet de moduler la consommation et d'augmenter à toutes les échelles la part de la production consommée localement. Les pertes dues à une gestion plus locale des effacements (dans le cas des 234 agrégats) sont négligeables malgré la quantité de contraintes qui sont ajoutées (contraintes de rapprochement des courbes de consommations et de production à l'échelle des 234 agrégats). Ces pertes peuvent être dues aux zones qui consomment déjà toute leur production avant modulation et pour lesquelles l'effacement n'apporte rien.

L'effacement permet une modulation plus efficace sur les zones les plus denses au regard des résultats obtenus.

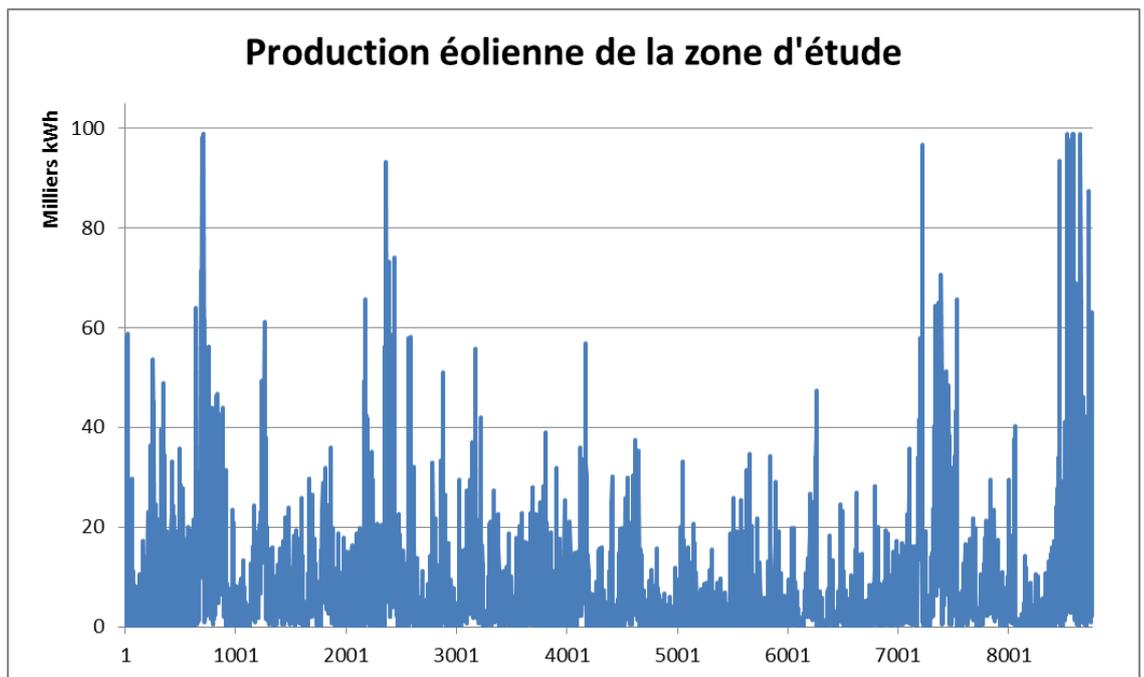
Il est néanmoins évident qu'un effacement portant sur uniquement 27% de la consommation d'électricité hors chauffage ne permet pas de consommer l'intégralité de la production solaire locale, que ce soit en hiver ou en été (cela est d'autant plus vrai si on se place durant la période estivale).

► **Selon un scénario de correspondance avec une production éolienne (scénario 3)**

Dans ce cas, les calculs ont été réalisés sur l'échelle de la zone d'étude complète, des découpages en 3 agrégats, 12 agrégats et 234 agrégats urbains. Ainsi, nous avons accès à 4 niveaux de résultats pour ce scénario.

Il a été choisi de simuler une production d'électricité d'origine éolienne avec une puissance installée d'environ 100 MW (soit le pic observé de consommation). La courbe objective est donc la production éolienne d'une année moyenne.

La courbe de production locale annuelle pour l'ensemble de la zone d'étude est donc la suivante :

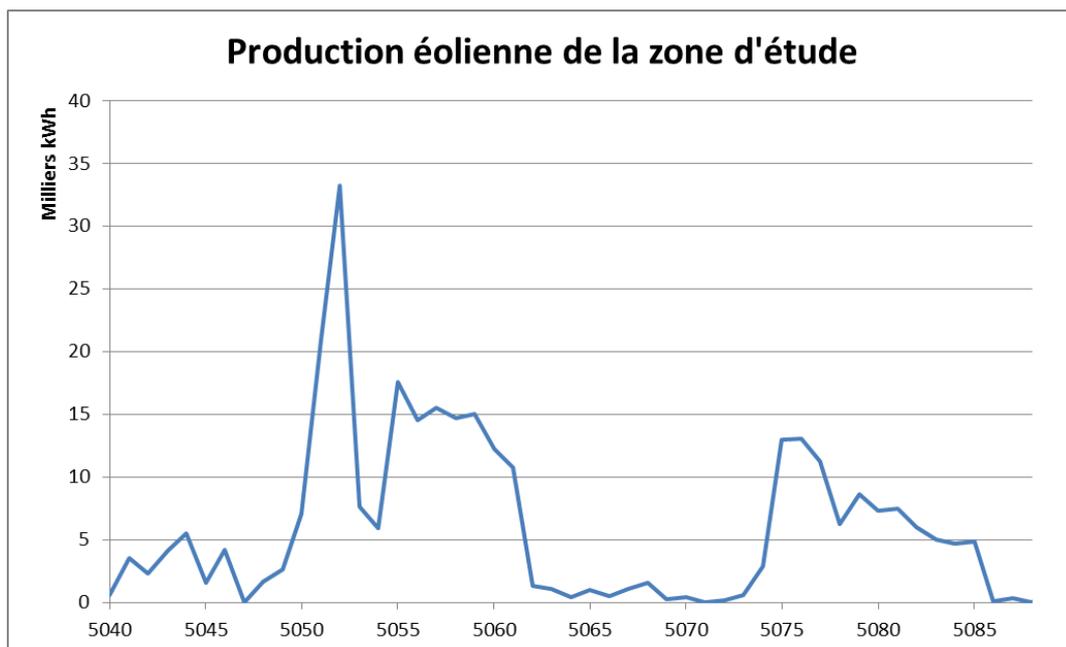


**Figure 34 : Production éolienne annuelle de la zone d'étude**

La production totale est d'environ 58,7 GWh sur l'année avec une puissance de crête d'environ 100 MW. Cette production annuelle représente environ 12,5% des consommations du territoire.

A la différence du scénario précédent, la production est ne semble pas présenter de saisonnalité (annuelle ou journalière) et nous n'observons pas de différences de production entre la journée et la nuit.

Le graphique suivant présente la production générée par le territoire pour 2 jours consécutifs en été :



**Figure 35 : Production solaire de la zone d'étude sur 2 jours d'été**

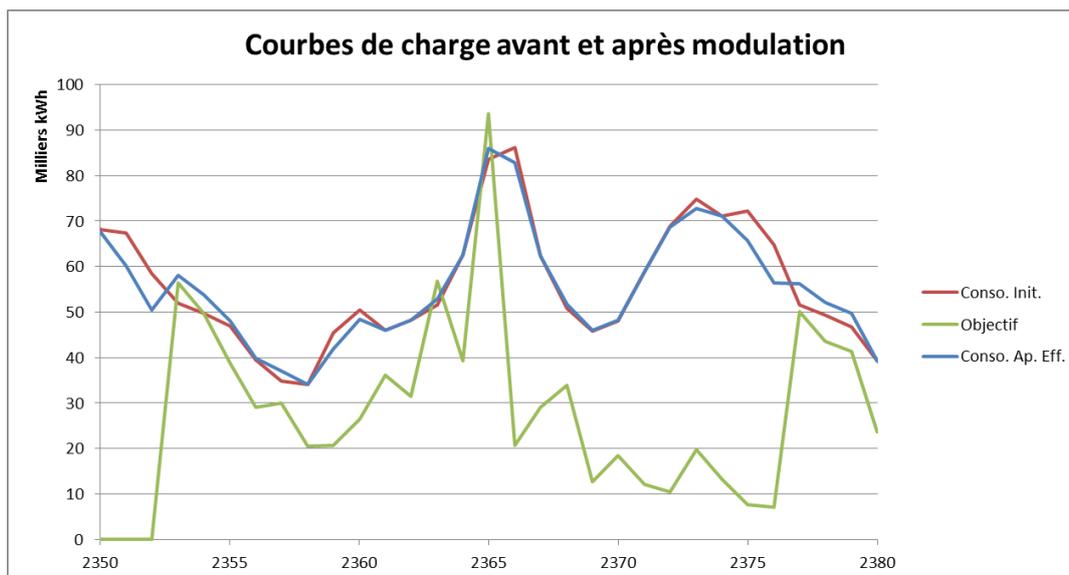
Il est d'ores et déjà possible d'affirmer que cette courbe objectif ne pourra pas être atteinte par de l'effacement : en effet, les usages effaçables ne représentent que 27% des consommations totales et la variabilité de la production éolienne est trop importante pour permettre un alignement parfait des courbes.

Etant donnée la relativement faible étendue de la zone d'étude, il a été considéré que le vent était uniforme sur l'ensemble de celle-ci (cela est bien entendu une hypothèse forte). La production éolienne étant dépendante de la vitesse du vent, on observe que celle-ci est très fréquemment en dessous de la consommation observée (lorsque le vent est faible ou trop fort). Il sera donc difficile de faire en sorte que la consommation modulée soit proche de l'objectif étant donné la différence d'ordre de grandeur entre ces 2 courbes.

Au regard des remarques précédentes, un indicateur d'efficacité faible est attendu. L'algorithme d'optimisation a donc été lancé sur l'ensemble des quatre découpages territoriaux.

Sur la zone d'étude complète, le résultat est un indicateur d'efficacité de 0,028. Cette valeur très faible correspond bien à ce qui était attendu.

En termes de courbes de charges le résultat est le suivant plusieurs heures consécutives :



**Figure 36 : Courbes de charges avant et après modulation**

La courbe verte est la courbe de production éolienne totale du territoire. La courbe rouge à la courbe de charge avant modulation et la courbe bleue correspond à la courbe de charge après modulation. On remarque sur le graphique ci-dessus que la consommation modulée est plus élevée en début de période (afin de s'approcher de l'objectif) puis plus faible lorsque l'objectif est inférieur à la consommation avant modulation. La courbe objective étant vraiment très différente de la consommation, l'effacement n'est pas efficace et le gain est très faible.

La production éolienne ne présentant pas de saisonnalité, l'indicateur d'efficacité est relativement stable tout au long de l'année et on n'observe pas de différence importante entre l'été et l'hiver comme cela était le cas dans le scénario précédent de production solaire.

Comme dans le cas d'une courbe objective égale à la production photovoltaïque d'électricité, l'indicateur d'efficacité n'est peut-être pas le plus pertinent puisqu'il s'agit essentiellement de mesurer la production d'électricité fatale qui est effectivement consommée localement.

Afin de mesurer la part de la production qui est consommée, il suffit de regarder pour chaque heure de l'année la part de la production qui est consommée localement. L'idée de la modulation des consommations par l'effacement est en effet de consommer une part plus grande de la production locale.

Comme cela a été précisé précédemment, la courbe objective fixée est en dessous de la courbe de consommation avant modulation (la courbe objective représente 12,5% de la consommation) donc la part de production consommée localement est initialement assez élevée : dans le cas de la consommation initiale, 98,3% de la production annuelle sont consommés localement. Cela représente 57,7 GWh. La modulation par l'effacement permet de consommer 0,3% supplémentaires et on atteint 57,9 GWh soit 98,5% de la production. L'effacement permet donc là aussi d'augmenter la part de la production consommée localement, même si l'ampleur de cette augmentation reste très faible (en effet, on part d'un état initial déjà très performant en terme de consommation de la production locale).

Selon la saison, la part de la production consommée localement varie peu (avant modulation : 97,6% en hiver et 99,7% en été – après modulation : 97,9% en été et 99,9% en hiver). La différence entre les 2 saisons s'explique majoritairement par le

fait que les consommations estivales sont moins élevées que les consommations durant l'hiver.

Le tableau suivant récapitule ces informations :

Période	Indicateur d'efficacité	Production éolienne (GWh)	Part consommée initiale	Part consommée après modulation
Année	0,028	58,76	98,3%	98,5%
Mai-Septembre	0,029	17,4	99,7%	99,9%
Octobre-Avril	0,027	41,4	97,6%	97,9%

**Tableau 9 : Résultats de l'effacement sur la zone d'étude**

Il est maintenant intéressant de regarder les résultats de la modulation de la consommation pour chacun des 3 découpages proposés : 3, 12 et 234 agrégats urbains. Ces agrégats diffèrent par les consommations engendrées par leurs habitants (il n'y a pas le même nombre de bâtiments et de ménages dans ces zones). La production éolienne simulée a été répartie de manière égale entre chacun des agrégats de manière à ce que la production totale soit toujours identique sur la zone d'étude complète.

Les résultats seront étudiés de plusieurs manières : nous regarderons le résultat de l'effacement à l'échelle de chacune des agrégats identifiés et le résultat de la modulation sur la zone complète (par agrégation des zones découpées). On s'attend a priori à des résultats similaires entre la zone d'étude complète et l'agrégation des zones découpées (la production éolienne et les consommations sont additives) mais avec des indicateurs d'efficacité plus faibles dans le deuxième cas (les contraintes sont alors plus importantes puisqu'il s'agit de s'approcher de la courbe de production à l'échelle de chacun des agrégats).

Les résultats sont les suivants pour chacune des 3 zones identifiées dans le premier découpage en agrégats urbains (les zones définies sont classées par ordre de densité décroissante) :

	Période	Indicateur d'efficacité	Production éolienne (GWh)	Part consommée initiale	Part consommée après modulation
Zone 1	Année	0,028	19,6	98,1%	98,4%
	Mai-Septembre	0,028	5,8	99,7%	99,8%
	Octobre-Avril	0,027	13,8	97,4%	97,8%
Zone 2	Année	0,036	19,6	92,1%	92,7%
	Mai-Septembre	0,037	5,8	97,0%	97,6%
	Octobre-Avril	0,035	13,8	90,0%	90,7%
Zone 3	Année	0,025	19,6	99,6%	99,8%
	Mai-Septembre	0,027	5,8	100,0%	100,0%
	Octobre-Avril	0,025	13,8	99,5%	99,7%

**Tableau 10 : Résultats de l'effacement sur le découpage en 3 zones**

On obtient donc des résultats sensiblement similaires à ceux obtenus pour la zone d'étude complète : l'indicateur d'efficacité est du même ordre de grandeur (~0,03). La part de la production d'électricité consommée localement diffère fortement selon les agrégats. En effet, les agrégats 1 et 3 consomment plus la production locale (entre 98% et 99%) tandis que l'agrégat 2 consomme « seulement » 92% de la

production éolienne locale. Il est à noter que l'impact de l'effacement est plus important sur l'agrégat 2 car celui-ci est initialement moins efficace.

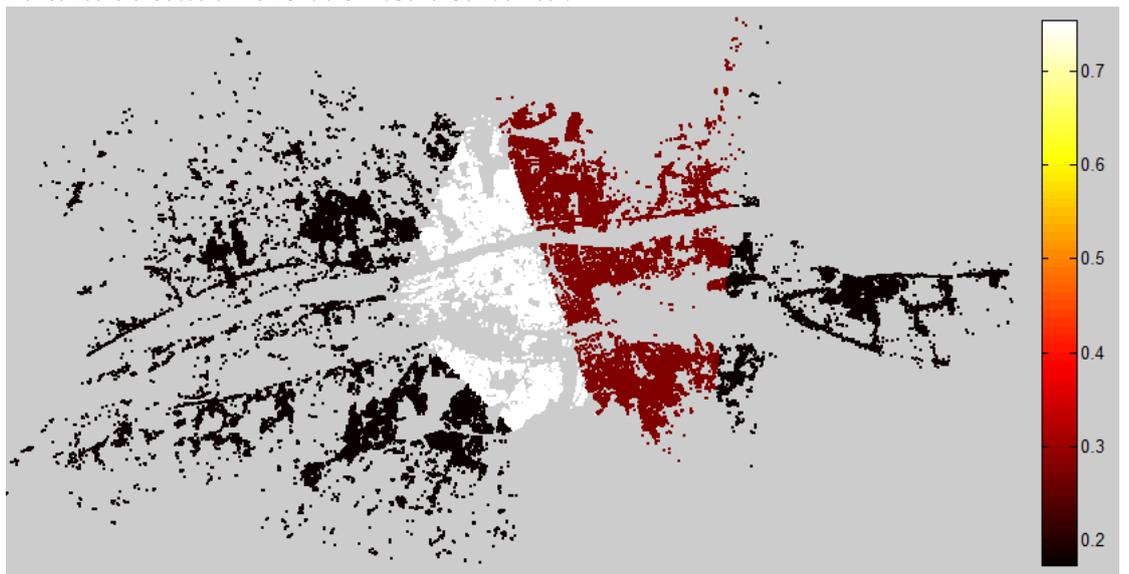
La carte suivante présente ces résultats de part de production consommée localement avant modulation (on compare ici à la consommation avant modulation : en jaune l'agrégat 1, en noir l'agrégat 2 et en blanc l'agrégat 3).



**Figure 37 : Part de la production locale d'électricité consommée avant modulation (3 agrégats)**

La procédure d'effacement permet d'améliorer cette part de consommation locale pour la totalité des zones d'environ 0,4% en moyenne.

La carte de cette amélioration est la suivante :



**Figure 38 : Augmentation de la part de la production locale d'électricité consommée après modulation (3 agrégats)**

L'augmentation la plus élevée a lieu sur l'agrégat 2 là où la part initiale était la plus faible (augmentation de 0,8%).

Si on compare maintenant les résultats générés par une optimisation de l'effacement sur les 3 agrégats à l'échelle de la zone globale, les résultats sont très proches de ceux obtenus lors de l'optimisation sur la zone globale.

En effet, l'indicateur d'efficacité global obtenu est de 0,028 (valeur identique à celle obtenue précédemment) et la part de la production consommée localement similaire (-0,015% par rapport à l'optimisation réalisée sur la zone globale). Ainsi, dans le cas d'un découpage en 3 agrégats, les résultats à l'échelle globale sont équivalents à ceux obtenus précédemment alors que des contraintes ont été rajoutées (l'optimisation a lieu sur les 3 agrégats et non plus uniquement sur la zone complète).

Pour les découpages en agrégats urbain suivants (12 et 234 zones), les résultats ne seront pas présentés entièrement pour des raisons évidentes de lisibilité. Des fourchettes de résultats, cartes et résultats à l'échelle globale seront fournis.

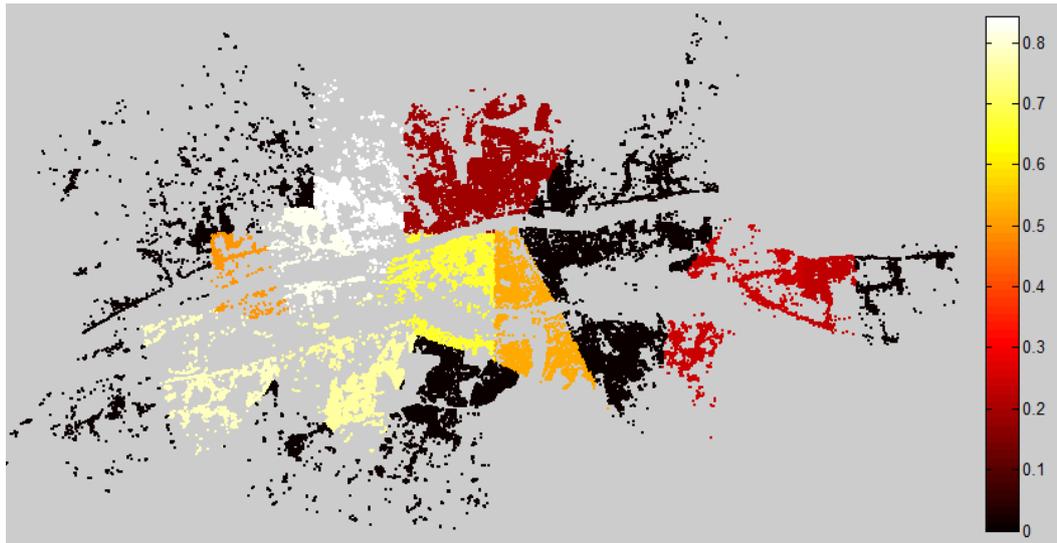
Dans le cas d'un découpage en 12 agrégats, les indicateurs d'efficacité varient entre 0,013 et 0,04. La part de la production consommée localement avant modulation varie entre 56,9% à 100% tandis que la part après modulation varie entre 57,2% et 100%.

La carte suivante présente ces résultats de part de production consommée localement avant modulation :



**Figure 39 : Part de la production locale d'électricité consommée avant modulation (12 agrégats)**

L'augmentation d'utilisation de la production locale au moyen de la modulation varie entre 0% et 0,84%. Celle-ci est présentée sur la carte suivante :



**Figure 40 : Augmentation de la part de la production locale d'électricité consommée après modulation (12 agrégats)**

Les augmentations les plus élevées ont lieu sur les agrégats qui consommaient une part relativement faible de leur production locale. Les nombreux agrégats en noir (augmentation nulle) sont ceux qui consommaient initialement l'ensemble de leur production locale et pour lesquels l'effacement n'apporte rien.

Les résultats de cette simulation sur 12 agrégats sont assemblés à l'échelle globale et les résultats sont là encore du même acabit que ceux de la simulation initiale : l'indicateur d'efficacité est de 0,027 et une production consommée localement en baisse de 0,06%.

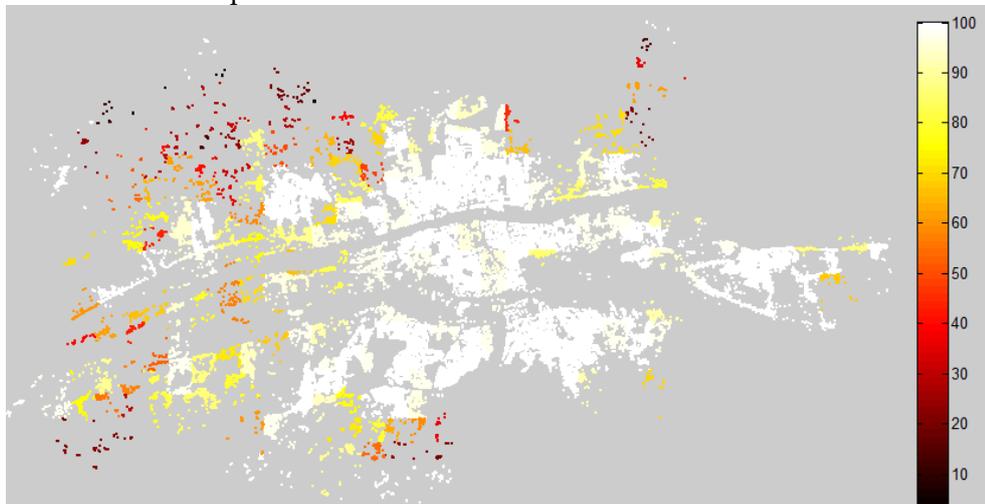
Ainsi les résultats sont encore tout à fait similaires à ceux produits dans la première simulation.

Le dernier découpage qui a été testé est le plus fin : 234 agrégats urbains ont été distingués.

Les indicateurs d'efficacité varient entre 0 (pas d'amélioration) et 0,045.

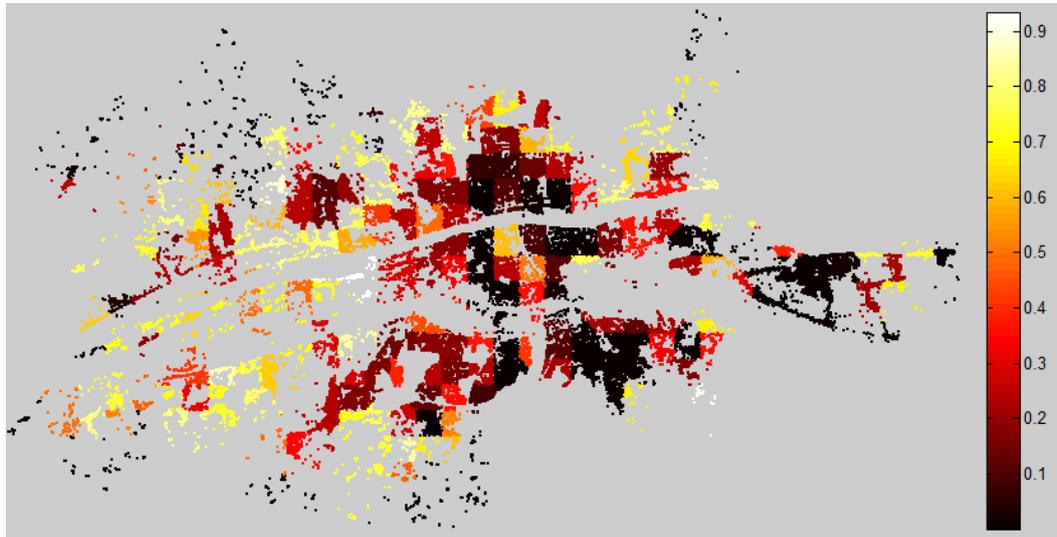
La part de la production consommée localement avant modulation varie selon les zones entre 4% et 100% et la part après modulation varie entre 4% et 100%.

Ces données sont présentées dans les cartes suivantes :



**Figure 41 : Part de la production locale d'électricité consommée avant modulation (234 agrégats)**

Une grande majorité des agrégats situés dans le centre-ville consomment déjà la totalité de la production générée localement (les agrégats de couleur blanche). L'augmentation de la consommation de la production locale grâce à la modulation par l'effacement est présentée dans la carte suivante :



**Figure 42 : Augmentation de la part de la production locale d'électricité consommée après modulation (234 agrégats)**

Là encore, les agrégats qui gagnent le plus sont ceux qui ne consommaient pas une part importante de leur production. Les agrégats qui consommaient (avant modulation par l'effacement) l'intégralité de leur production locale n'ont pas tiré profit de l'effacement qui n'apporte rien dans ce cas.

L'agrégation des résultats à l'échelle globale a été réalisée afin de pouvoir comparer cette simulation avec celle effectuée directement sur la zone complète. L'indicateur d'efficacité est alors de 0,027 et la production consommée localement après modulation chute de 0,075% ce qui reste négligeable.

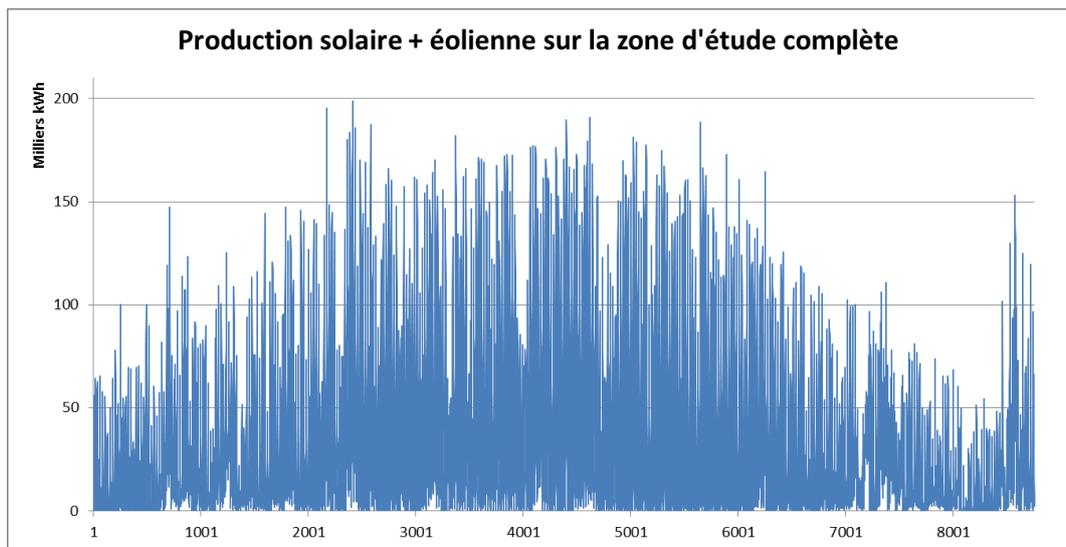
L'analyse de ces résultats montre que la modulation des consommations par l'effacement des 4 usages retenus (lave-linge, lave-vaisselle, sèche-linge et ECS) ne permet pas d'augmenter sensiblement la consommation locale de la production d'électricité d'origine éolienne de par la faible production qui a été simulée (la consommation avant modulation est déjà très fréquemment supérieure à la production locale). L'étude montre que, quelle que soit la maille spatiale choisie (d'un découpage en 234 agrégats à la zone complète) l'effacement permet de moduler la consommation et d'augmenter à toutes les échelles la part de la production consommée localement. Les pertes dues à une gestion plus locale des effacements (dans le cas des 234 agrégats) sont négligeables malgré la quantité de contraintes qui sont ajoutées (contraintes de rapprochement des courbes de consommations et de production à l'échelle des 234 agrégats). Ces pertes peuvent être dues aux zones qui consomment déjà toute leur production avant modulation et pour lesquelles l'effacement n'apporte rien.

► **Selon un scénario de mix de production locale composé exclusivement d'énergie renouvelable fatale (solaire et d'éolien)-Scénario 4**

Dans ce cas, les calculs ont aussi été réalisés sur l'échelle de la zone d'étude complète, des découpages en 3 agrégats, 12 agrégats et 234 agrégats urbains. Ainsi, nous aurons accès à 4 niveaux de résultats pour ce scénario.

Dans ce scénario, on rajoute la production éolienne à la production solaire définie auparavant. Celle-ci est définie par une capacité égale au maximum du pic de charge de consommation pour chacune des zones (soit environ 100 MW pour la zone d'étude complète).

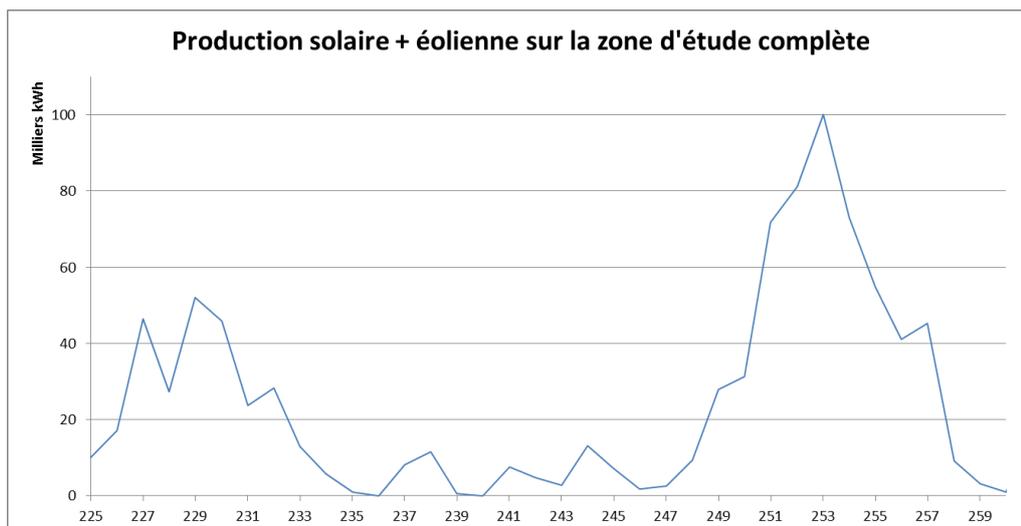
La courbe de la production totale (éolienne + solaire) est la suivante :



**Figure 43 : Production solaire et éolienne annuelle de la zone d'étude**

La production annuelle vaut 298 GWh (environ 58 GWh ont été rajoutés par la production d'électricité des éoliennes) avec un pic de charge aux alentours de 200 MW. La production est donc légèrement impactée (une augmentation de 58 GWh soit environ 20% par rapport au cas précédent) au niveau annuel. On s'attend donc à des résultats comparables à ceux obtenus dans le scénario 2 (production solaire uniquement) en termes d'indicateur d'efficacité.

Néanmoins la production n'est plus nécessairement nulle durant les heures de nuit et cela permettra plus de flexibilité à l'algorithme de modulation de la consommation. La production nocturne sera nécessairement réalisée par les éoliennes et sera donc relativement faible par rapport à la production solaire. Cette production nocturne est illustrée par le graphique suivant :



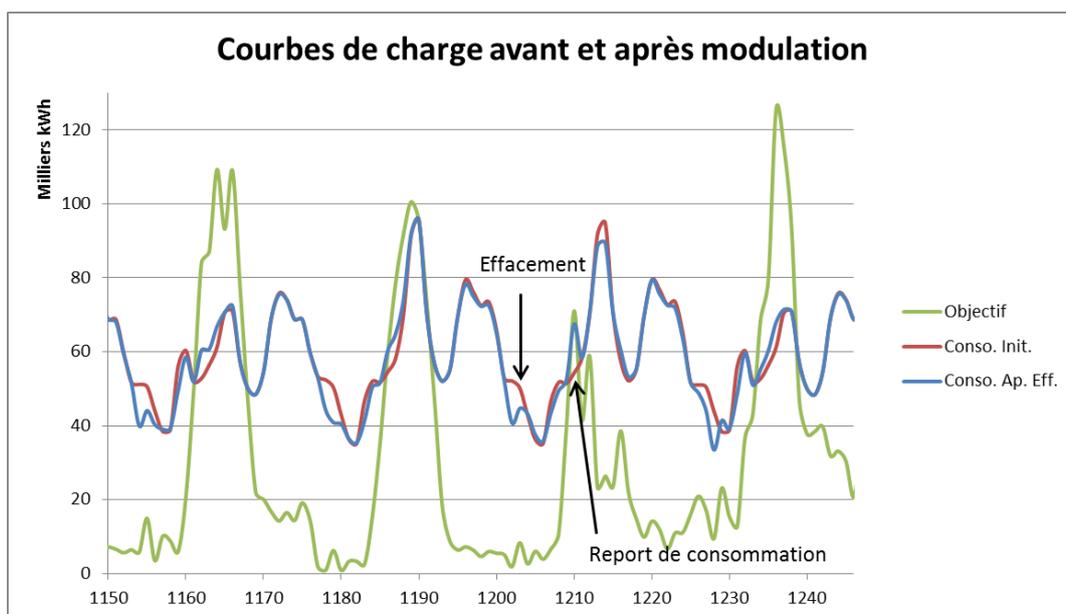
**Figure 44 : Production solaire et éolienne sur 35 heures consécutives de la zone d'étude**

On s'attend donc à des indicateurs d'efficacité du même ordre de grandeur que ceux précédemment obtenus mais légèrement plus élevés étant donné la production nocturne engendrée par la mise en place d'éoliennes.

On reprendra dans la suite les mêmes indicateurs que ceux fournis dans le deuxième scénario.

L'indicateur d'efficacité obtenu sur l'ensemble de la zone est de 0,054 soit 8% plus élevé que celui obtenu dans le scénario précédent.

Si on regarde plus précisément la modulation de la courbe de charge engendrée par l'effacement, on observe bien un rapprochement de la consommation modulée et de la fonction objective :



**Figure 45 : Courbes de charges avant et après modulation sur 4 jours d'hiver**

On observe également bien le fait que la courbe objective n'est plus nécessairement nulle durant les heures de nuit (il suffit de comparer ce graphique avec l'équivalent du scénario 2 sur les mêmes heures).

La part de la production consommée localement avant modulation est de 65,7% tandis qu'elle passe à 67% après modulation de la consommation.

Les résultats détaillés sont décrits dans le tableau suivant :

Période	Indicateur d'efficacité	Production solaire (GWh)	Part consommée initiale	Part consommée après modulation
Année	0,054	298,5	65,70%	67,00%
Mai-Septembre	0,056	171,4	54,00%	55,10%
Octobre-Avril	0,053	127	81,60%	83,00%

**Tableau 11 : Résultats de l'effacement sur la zone complète**

Ainsi, après modulation 200 GWh sont consommés localement. La modulation permet une augmentation de cette consommation locale de la production de 1,9%. Ainsi 43 GWh supplémentaires sont consommés localement par rapport au scénario 2. Il semble donc qu'une grande partie des 48 GWh produits par les éoliennes soit consommée localement.

Il est également intéressant de regarder les résultats pour chacun des 3 découpages en agrégats urbains.

Dans le premier cas (découpage en 3 agrégats urbains), les résultats sont les suivants :

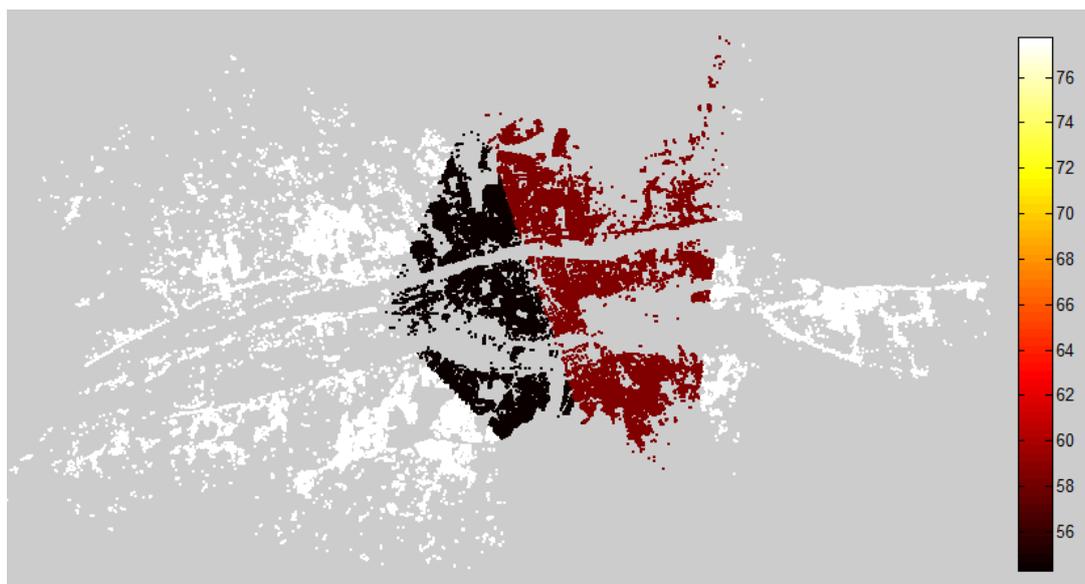
	Période	Indicateur d'efficacité	Production solaire (GWh)	Part consommée initiale	Part consommée après modulation
Zone 1	Année	0,047	113,6	58,5%	59,6%
	Mai-Septembre	0,042	66,4	46,5%	47,3%
	Octobre-Avril	0,054	47,2	75,4%	76,8%
Zone 2	Année	0,044	71,5	54,3%	55,3%
	Mai-Septembre	0,037	42,1	42,3%	43,0%
	Octobre-Avril	0,055	29,4	71,5%	72,9%
Zone 3	Année	0,056	113,4	77,7%	79,1%
	Mai-Septembre	0,074	62,9	68,1%	69,7%
	Octobre-Avril	0,046	50,5	89,8%	90,9%

**Tableau 12 : Résultats de l'effacement sur le découpage en 3 agrégats**

Ainsi, les indicateurs d'efficacité vont de 0,044 jusqu'à 0,056. Les résultats sont donc légèrement supérieurs à ceux obtenus dans le cas du scénario 2 avec le même découpage territorial. Cela est dû comme il a déjà été dit à l'apport éolien qui est souvent consommé directement (notamment durant les heures de nuit).

La part de la production consommée localement avant modulation est comprise entre 54,3% et 77,7% tandis qu'elle passe à des niveaux compris entre 55,3% et 79,1% après modulation. On observe ainsi une augmentation de cette part de 1,9% sur l'ensemble des 3 agrégats urbains.

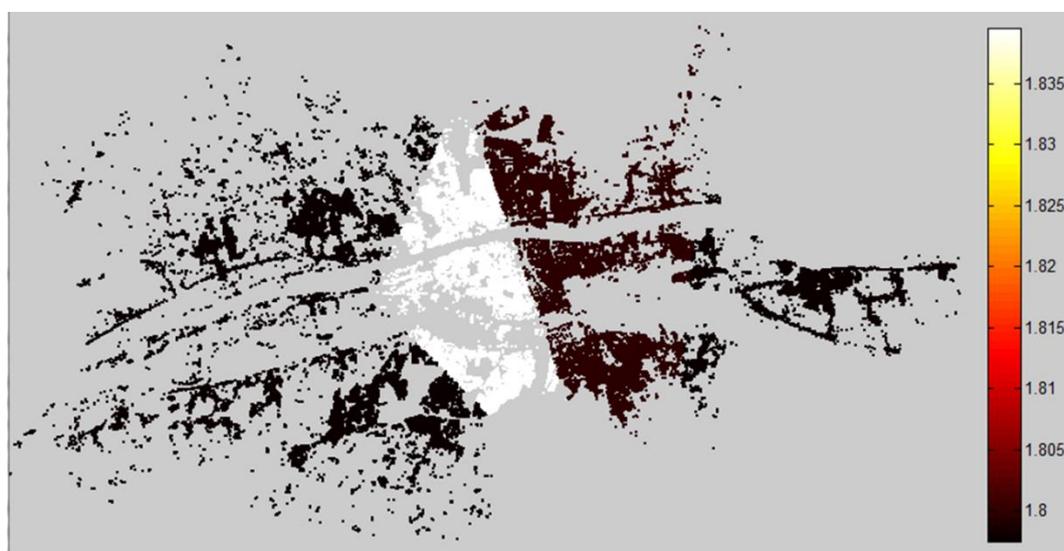
Ces résultats sont présentés dans les 2 cartes suivantes :



**Figure 46 : Part de la production locale d'électricité consommée avant modulation (3 agrégats)**

Par rapport au scénario 2, on remarque que la zone qui consomme la part la plus faible de sa production d'électricité fatale est la même (la zone 2, dans le centre de la carte). Cela semble somme toute logique puisqu'une majeure partie de la production est portée par le solaire.

L'augmentation de cette part de consommation de la production après modulation est présentée dans la carte suivante :



**Figure 47 : Augmentation de la part de la production locale d'électricité consommée après modulation (3 agrégats)**

Tout d'abord on retrouve l'augmentation d'environ 1,9% pour les 3 agrégats après modulation. Si on compare au scénario 2, on observe que cette augmentation est plus faible (~2,1% dans le cas du scénario 2). Une explication peut être le fait que la quantité d'électricité produite par les éoliennes est relativement faible par à celle produite par les façades équipées de panneaux photovoltaïques. Ainsi, la production éolienne est en grande majorité consommée localement (avant et après

modulation). L'enjeu de la modulation semble donc toujours se situer au niveau de la production solaire et l'augmentation qu'elle engendre est plus faible étant donné que la production totale est plus importante.

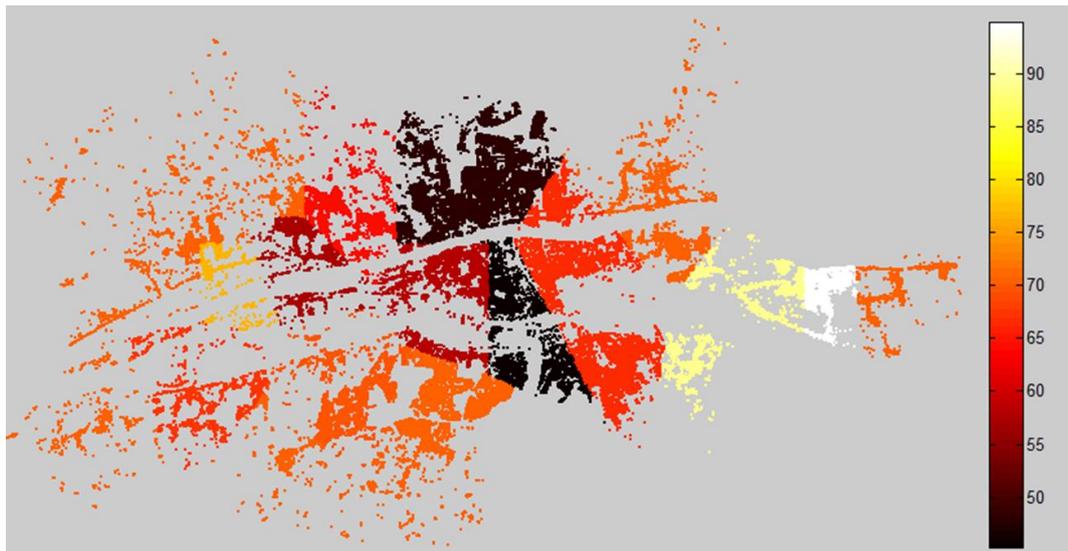
Il est à noter que l'augmentation la plus élevée a toujours lieu sur l'agrégat urbain dont la part de consommation de la production était la plus faible avant la modulation.

Si on regarde maintenant les résultats obtenus sur les 3 agrégats urbains à l'échelle de la zone d'étude globale, l'indicateur d'efficacité obtenu est de 0,05 soit une baisse de 6% par rapport aux résultats obtenus sur la zone complète. La consommation locale de la production perd 22 MWh soit 0,01%, ce qui reste très faible.

Dans le cas d'un découpage en 12 agrégats urbains, l'indicateur d'efficacité varie entre 0,03 et 0,06. La part de la production consommée localement avant modulation est comprise entre 45,2% et 94,9% tandis qu'elle passe à des niveaux compris entre 46% et 95,8% après modulation.

L'augmentation de cette part de la production consommée localement après modulation est comprise suivant les agrégats urbains entre 1% et 2%.

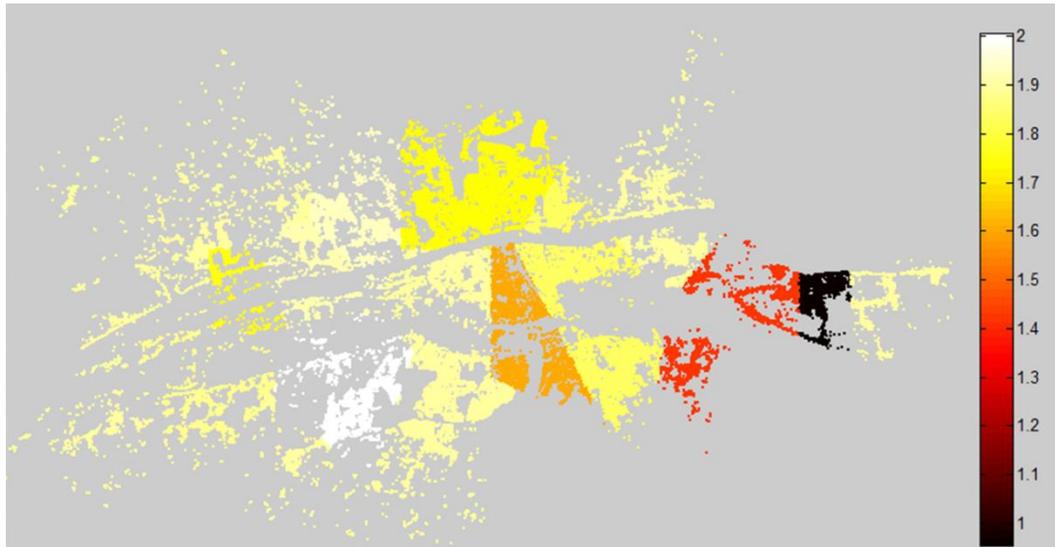
Ces résultats sont présentés sur les cartes suivantes :



**Figure 48 : Part de la production locale d'électricité consommée avant modulation (12 agrégats)**

On retrouve des résultats similaires à ceux obtenus pour les 3 agrégats urbains précédents. La région centrale (la plus densément peuplée) est toujours celle qui consomme la part la plus faible de sa production.

L'augmentation de la part de la production consommée localement est plus faible que dans le cas du scénario 2 pour les mêmes raisons que celles évoquées dans le cas des 3 agrégats urbains.

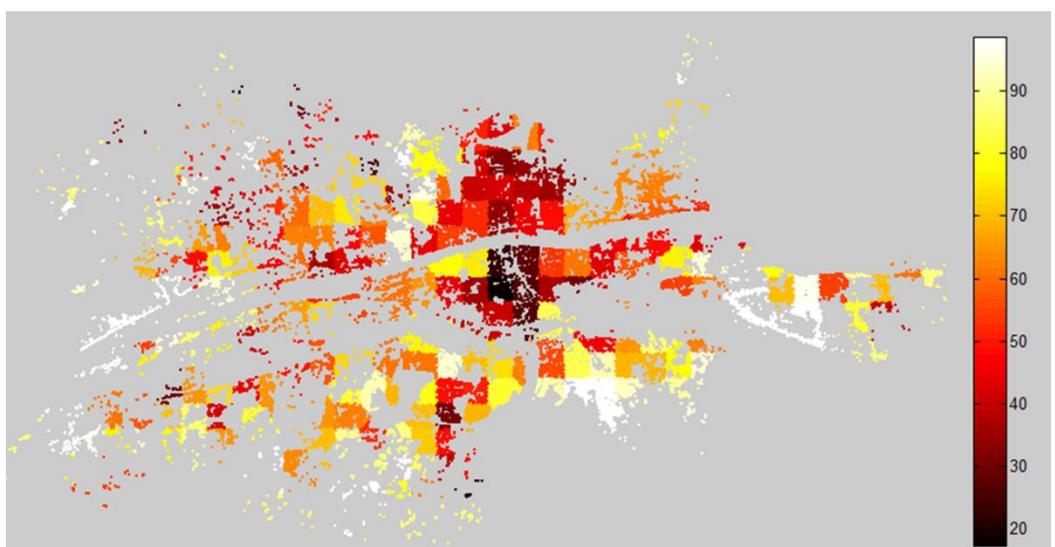


**Figure 49 : Augmentation de la part de la production locale d'électricité consommée après modulation (12 agrégats)**

A l'échelle globale (en agréant les 12 zones), l'indicateur d'efficacité est de 0,053 soit une valeur très proche de celle obtenue à l'échelle de la zone complète. La part de la production consommée localement chute de 86 MWh soit 0,04%, ce qui est très faible. Il semble donc que les résultats obtenus à l'échelle globale via le découpage en 12 agrégats urbain sont très similaires à ceux obtenus directement à l'échelle globale.

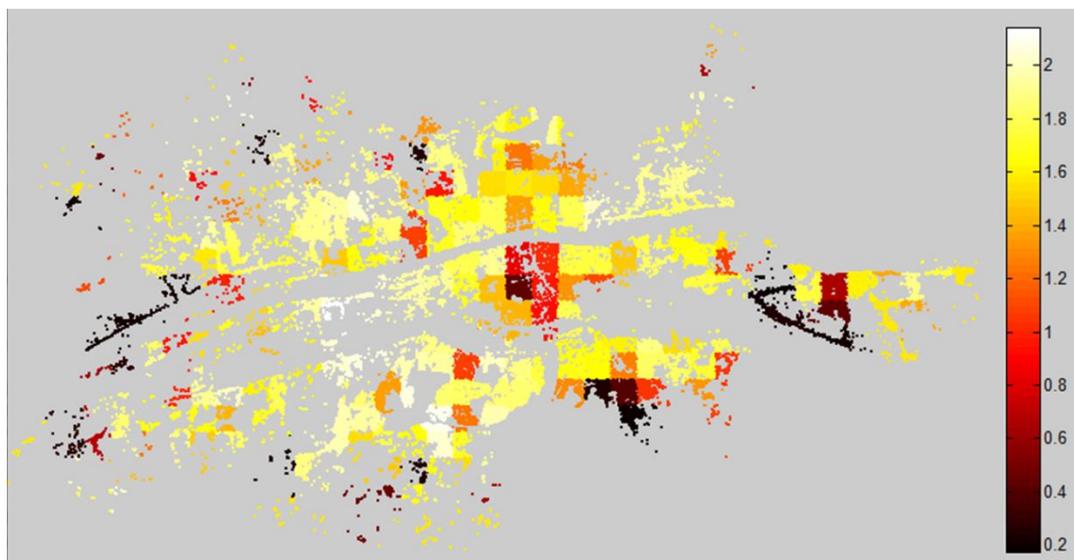
Le découpage en 234 agrégats fait apparaître les résultats suivants : l'indicateur d'efficacité varie selon la zone entre 0,004 et 0,065. La part de consommation de la production avant modulation varie entre 17,3% et 98,7% et celle-ci passe à des valeurs comprises entre 17,4% et 98,9% après modulation par l'effacement des 4 usages. L'augmentation de la part de la production consommée localement est comprise entre 0,2% et 2,1%.

Les cartes suivantes présentent ces résultats :



**Figure 50 : Part de la production locale d'électricité consommée avant modulation (234 agrégats)**

L'ajout d'une production éolienne a pour effet qu'il n'existe plus de agrégat urbain consommant l'intégralité de sa production avant modulation comme cela était le cas dans le scénario 2. La modulation ne permet pas d'atteindre une part de consommation de la production de 100% sur la moindre zone. L'augmentation de cette part engendrée par la modulation est comprise entre 0,2% et 2,1% comme le montre la carte suivante :



**Figure 51 : Augmentation de la part de la production locale d'électricité consommée après modulation (234 agrégats)**

Comme cela avait déjà été remarqué, les augmentations les plus faibles ont lieu dans les zones qui avaient une part de consommation de leur production déjà élevée (zones en noir sur la carte ci-dessus).

#### ► Bilan des scénarii 2 ,3 et 4

Les résultats des scénarii 2, 3 et 4 sont rassemblés dans ce paragraphe afin de les analyser à l'échelle globale et comparer les simulations réalisées sur les différents découpages en agrégats urbains.

Le tableau suivant recense les différents résultats déjà présentés en détail ci-dessus :

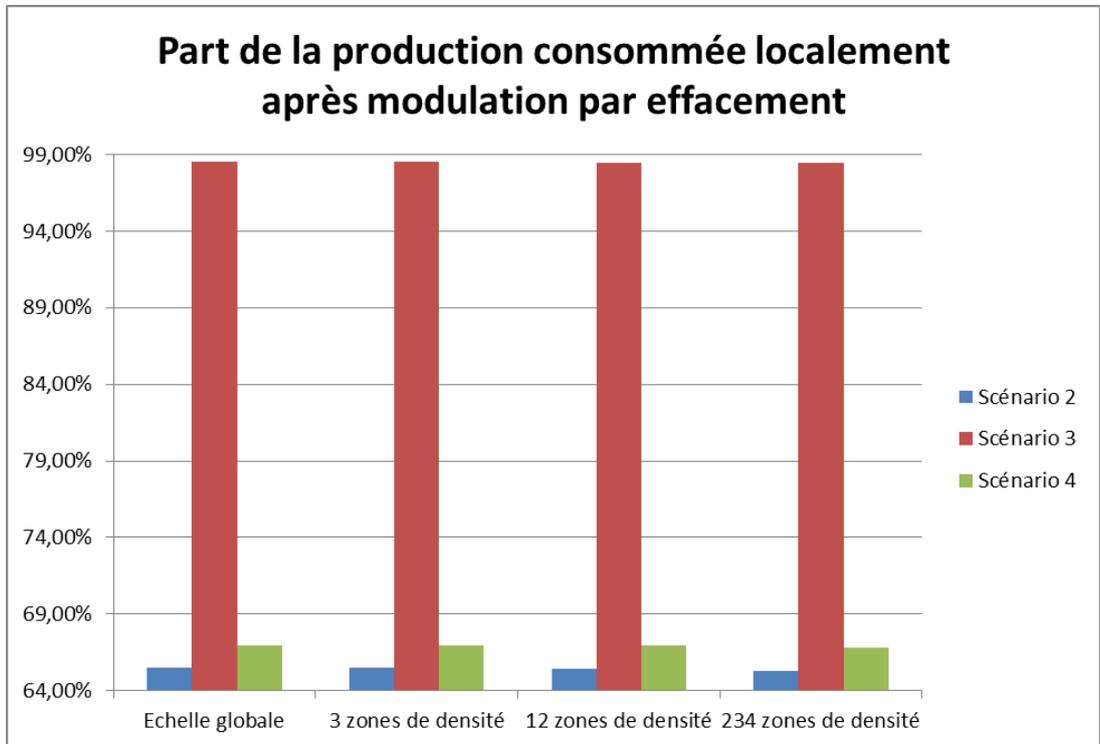
Maille spatiale de traitement	Indicateur d'efficacité			Part la production consommée localement après modulation			Augmentation de la part consommée localement due à la modulation		
	Scénario 2	Scénario 3	Scénario 4	Scénario 2	Scénario 3	Scénario 4	Scénario 2	Scénario 3	Scénario 4
Echelle globale	0,050	0,028	0,054	65,48%	98,25%	66,98%	2,19%	0,26%	1,89%
3 agrégats	0,050	0,028	0,054	65,48%	98,25%	66,97%	2,18%	0,25%	1,88%
12 agrégats	0,049	0,027	0,054	65,45%	98,25%	66,95%	2,13%	0,19%	1,84%
234 agrégats	0,046	0,027	0,051	65,27%	98,25%	66,80%	1,86%	0,18%	1,62%

**Tableau 13 : Résultats comparés des scénarii 2, 3 et 4**

On remarque que les résultats sont sensiblement identiques pour tous les découpages en agrégats urbains sur lesquels ont eu lieu les simulations. Seul le

découpage en 234 agrégats donne des résultats légèrement moins bons (cela est à nuancer car les résultats restent dans la plage d'incertitude liée aux modèles qui ont été déployés).

Les résultats sont présentés sur le graphique suivant :



**Figure 52 : Part de la production locale d'électricité consommée après modulation selon les découpages territoriaux**

On remarque que de l'échelle globale au découpage en 12 agrégats, les résultats en termes de part de la production consommée localement sont quasiment similaires.

Selon les agrégats, la part de production consommée localement diffère quelque peu, comme le montre le tableau suivant des minima et maxima de part de production locale consommée :

Maille spatiale de traitement	Minimum et maximum de production consommée localement avant modulation			Minimum et maximum de production consommée localement après modulation		
	Scénario 2	Scénario 3	Scénario 4	Scénario 2	Scénario 3	Scénario 4
<b>3 agrégats</b>	52% - 77,4%	92,1% - 99,6%	54,3% - 77,7%	53,1% - 79,1%	92,7% - 99,8%	55,3% - 79,1%
<b>12 agrégats</b>	42,9% - 97,6%	56,9% - 100%	45,3% - 94,9%	43,7% - 98,4%	57,2% - 100%	46% - 95,8%
<b>234 agrégats</b>	15,86% - 100%	3,9% - 100%	17,3% - 98,73%	15,97% - 100%	4% - 100%	17,37% - 98,9%

**Tableau 14 : Minima et maxima de consommation locale de la production**

Dans tous les cas de figure, l'effacement permet d'augmenter la part de la production consommée localement sur tous les agrégats tout en n'impactant que légèrement l'optimisation à l'échelle de la zone d'étude complète.

Ce phénomène plaide donc pour une gestion à une échelle plus fine que l'EPCI car les réseaux électriques à mettre en place seront moins longs et donc moins coûteux à mettre en place. Néanmoins, les résultats à l'échelle des 234 agrégats urbains montrent que cela n'est pas possible indéfiniment et qu'il faut se fixer des objectifs de consommation locale ex-ante (à partir des gisements identifiés à l'échelle globale) et simuler sur différents découpages afin de trouver la bonne échelle territoriale, qui ne dégrade pas trop les résultats de la modulation à l'échelle globale.

Si ces résultats sont plutôt satisfaisants (dans le sens où le choix de la maille spatiale de traitement n'a a priori qu'une importance relative), il est maintenant nécessaire de sortir de la théorie afin de s'intéresser aux pratiques réelles des habitants, leur perception de l'effacement ainsi que son acceptabilité afin de nuancer les résultats présentés jusqu'à présent.

## III.2. Analyse à l'échelle microscopique des pratiques dans les logements

---

### III.2.a. La structure des usages par type de ménage : constitution de l'échantillon

Le projet Toaster s'est doté d'un volet consacré au levier comportemental, individuel et collectif. Afin d'accéder aux pratiques des ménages, ainsi qu'aux logiques de leur imbrication et de leur enchaînement, nous avons opté pour une approche socio-ethnologique descriptive, et recouru à des entretiens semi-directifs et à des observations *in situ*, avec de nombreuses prises de vue pour recueillir les données. Ces prises de vue constituent un matériau d'analyse riche qui rend possible l'accès à des niveaux de commentaires et de détails relativement fins.

Compte-tenu des objectifs de la partie sociologique de Toaster, nous n'avons pas constitué un échantillon représentatif au sens statistique du terme. Toutefois, pour appréhender au mieux la diversité des pratiques et des organisations domestiques, nous avons retenu plusieurs critères à partir desquels s'est faite la sélection des ménages. Ces critères permettent « d'alimenter » le modèle Toaster à partir d'éléments sur les pratiques et les représentations en matière d'usages associés à l'énergie, à l'échelle micro, ici celle du foyer :

- Profession et Catégorie Sociale (PCS) : impact des capitaux détenus sur le choix des équipements ou encore sur les marges d'action possible ;
- Age et cycle de vie : accéder à une hétérogénéité de pratiques, à des organisations stables ou en transition ;
- Composition du foyer : nombre et profils des occupants ;
- Statut d'occupant (propriétaire / locataire, logement individuel ou collectif).

Au-delà de ces caractéristiques utiles à l'analyse et à l'élaboration de profils de foyers et d'usages de l'énergie, nous avons sélectionné deux variables structurantes, d'abord pour donner un sens aux pratiques énergétiques (au sens large, c'est-à-dire qui intègrent les équipements et les formes d'occupation du logement), ensuite pour rendre compte des logiques d'effacement, des reports ou des formes de concaténation des usages :

- Foyers avec ou sans enfant. La présence et l'âge des enfants structurent les organisations familiales, induisent des usages, des exigences en matière de confort et d'équipements, d'heures et de jours de sollicitation ;
- Foyers sans, avec actifs ou bi-actifs, autrement dit prise en compte du niveau de présence au domicile dont on sait qu'il n'est pas sans effet sur le niveau d'équipement, les formes et les conditions de sollicitation (niveau de température et de confort, moments et plages d'utilisation...

La prise en compte de ces variables permet d'accéder à une organisation collective - le foyer étant une unité de vie collective- qui résulte de négociations entre les différents membres qui la constituent. La multiplicité, et parfois la contradiction, des aspirations et attentes des membres du foyer aboutissent à des compromis et à des arbitrages, eux-mêmes susceptibles d'être renégociés à tout moment.

Au total, une vingtaine d'interviews a été réalisée. Ils ont permis de recueillir différents types de matériaux. Il s'est d'abord agi de saisir les organisations mises en œuvre et les usages domestiques à partir de restitutions fines des cycles journaliers, et ce en considérant l'ensemble des membres qui constituent l'unité familiale. Ces échanges avaient également pour objectif d'accéder aux évolutions -marginales ou de plus grande ampleur- de certaines pratiques, de saisir la genèse de ces évolutions et leur inscription -ou non- dans la longue durée. A travers ces descriptions, c'est également la place qu'occupe la thématique de l'énergie (existence d'une culture énergétique, les questions liées à la sensibilisation ou encore à la compréhension, les attentes...) qui a pu être abordée. En parallèle des entretiens, nous avons réalisé un *inventaire technique* des équipements détenus en veillant, pour chaque appareil recensé ou chaque pièce visitée, à recueillir les données d'usages associés (fréquence et conditions d'utilisation, profil de l'utilisateur..), à travers la réalisation d'un *planning journalier* sur une semaine dite type. Cette organisation des recueils a facilité la parole et a permis aux interviewés d'aborder très librement et très finement les pratiques pour lesquelles la transformation voire la réforme plus radicale est envisageable ou difficilement voire impossible à envisager. A chaque fois que ceci a été possible, l'entretien a été réalisé en présence du couple, dans certains cas de celle des enfants. Les interactions entre les participants ont permis de mettre à jour l'hétérogénéité des points, les leviers d'actions ainsi que les résistances au niveau individuel et collectif.

Nom foyer	Composition du foyer	Age des parents	Age des enfants	Statut parent	Statut enfants	Lieu d'habitat (Cen., Agglo, Rur.)	Type de logement (Maison / App.)	Statut d'occupation (Pro. / Loc.)	Age du logement	Niveau revenu (millier d'euros)
1	4	35 (M.) 44 (Mme)	18 1	Salariés	Scolaire crèche	Agglo	A	P	1980	4-5
2	5	41 (M) 45 (Mme)	14 11 8	Salariés	Scolaire	Agglo	M	P	1970	4-5
3	1	80		Retraitée (veuve)		Cen	A	P	1985	1-2
4	6	44 (M) 44 (Mme)	18 15 12 9	Salariés	Scolaire	Cen	M	P	1897	4-5
5	2	31 (M) 42 (Mme)		Indépendant Salariée		Cen	M	L	1970	3-4
6	1	64 (Mme)		Retraitée		Cen	A	P	1970	2-3
7	2	36 (M) 42 (Mme)		Dirigeant d'Ent. Salariée		Cen	A	P	1950	4-5
8	4	43 (M) 37 (Mme)	7 2	Commerçant Salariée	Scolaire crèche	Cen	A	P	1500	2-3
9	4	47 (M) 46 (Mme)	18 15	Salariés	Scolaire	Rur	M	P	19 <sup>ème</sup>	3-4
10	3	28 (Mr) 26 (Mme)	2	Salariés			A	L	Début 20 <sup>ème</sup>	3
11	3	45	16 19	Salarié	Scolaire et étudiant	Rur	M	P	neuve	3
12	1	42		Salarié		Rur	M	P	1970	2
13	2	55 (Mr) 54 (Mme)		Indépendant Femme au foyer		Agglo	M	P	1980	3
14	4	43 (M) 42 (Mme)	15 13 9	Salariés	Scolaire	Agglo	M	P	2001	4-5
15	1	42		Salariée		Cen	M	P	19 <sup>ème</sup>	2-3
16	5	48 (M) 46 (Mme)	14 12 10	Salariés	Scolaire	Cen	M	P	Début 20 <sup>ème</sup>	6-7
17	4	50 (M) 48 (Mme)	19 13	Salariés	Scolaire	Cen	A	P	19 <sup>ème</sup>	4-5
18	5	53 (M) 51 (Mme)	19 15 12	Salarié Indépendante	Etudiant Scolaire	Agglo	M	P	19 <sup>ème</sup>	5-6
19	5	57 (M) 51 (Mme)	24 19 13	Salariés	Etudiants Scolaire	Cen	A	P	15-16 <sup>ème</sup>	6-7

**Tableau 15 : Constitution de l'échantillon**

SALON	
SALLE A MANGER	
CUISINE	
SALLE DE BAIN	
CHAMBRE (Parents)	
CHAMBRES(Enfants)	
GARAGE, CAVE AUTRE	

**Tableau 16 : Inventaire « technique » des appareils électriques présents dans le foyer,  
en précisant la marque, le modèle et la puissance en watt**

	LUNDI
MATIN	
APRES-MIDI	
	MARDI
MATIN	
APRES-MIDI	

**Tableau 17 : Planning journalier (sur une durée d'une semaine, intégrant le week-end) des pratiques et des utilisations des équipements électriques et électroménagers (avec enchainements & combinaisons), ceci pour l'ensemble des membres de l'unité familiale**

### III.2.b. Comprendre les usages dans la perspective d'éventuelles demandes d'effacement

#### ► Des éléments de contexte dans lesquels replacer la thématique Smart Grid

Les organisations décrites tiennent compte d'un ensemble d'éléments de contexte indispensables à prendre en compte pour saisir le positionnement des interviewés, repérer ce qui relève d'impossibilités organisationnelles ou bien d'incompréhensions, voire de craintes autour des conséquences des enjeux énergétiques.

#### *Une culture de l'énergie incomplète et fragile*

Pour la plupart des interviewés, l'énergie, et les enjeux et défis qu'elle recèle, demeure une abstraction. Qu'ils soient appréhendés à l'échelle macro (le devenir de la planète, l'épuisement de sources énergétiques, les risques pour l'humanité) ou à l'échelle micro (celle du territoire proche et de la sphère privée), les défis énergétiques apparaissent extrêmement difficiles à matérialiser. Les interviews déclarent que les problématiques liées à l'eau sont beaucoup plus évidentes à saisir et font sens avec la vie quotidienne. Agir sur les consommations d'eau semble plus facile à mettre en œuvre et constitue un levier de sensibilisation et d'action « palpable et mesurable ». « *c'est très difficile à expliquer mais c'est plus simple de voir ce que l'on peut faire en matière de consommation d'eau que d'électricité. Du coup, avec des enfants, on est dans le concret tout de suite. Un robinet qui coule sans raison, ils comprennent que c'est de l'eau gaspillée. Une lumière allumée dans une pièce vide, ils comprennent qu'il faut éviter mais c'est plus difficile de prendre conscience que... L'eau, elle est là, on la voit. L'électricité, c'est déjà plus virtuelle* » ((Foyer 16).

Les foyers font par ailleurs état d'une relation historique à l'énergie, et à sa fourniture, construite sur une forme de passivité, toute autant souhaitée par les fournisseurs d'énergie et les gestionnaires de réseaux historiques -l'appellation de « tiers de confiance » continue à être parfois entendue- qu'acceptée par les agents sociaux qui jusqu'à peu ne percevaient pas d'intérêt important à s'impliquer sur une thématique à faible valeur de distinction sociale. Encore aujourd'hui, et même s'ils parlent d'attentes fortes en matière d'informations, notamment techniques, tarifaires, en lien avec la conception du bâti, ils admettent entreprendre assez peu de démarches concrètes dans ce sens.

Enfin, pour argumenter sur le caractère encore inachevé de cette culture de l'énergie, les interviewés évoquent un sentiment de maîtrise très relatif. Qu'il s'agisse de la qualité du bâti, dont une partie non négligeable de la population hérite lorsqu'elle achète un bien immobilier existant ou encore des ressources financières mobilisables, les foyers estiment ne pas détenir tous les leviers pour agir concrètement. « *tu peux être très vertueux au niveau comportement mais quand comme nous, tu achètes une maison de plus d'un siècle, tu es dans une passoire énergétique. On fait très attention mais beaucoup dépend de la conception de la maison, et là à moins d'être sur un investissement très lourd, sachant qu'on a déjà mis plus de 10.000 € dans l'isolation des ouvrants, on est limité. On cesse un peu d'avoir la main.* » (Foyer 4). Sentiment de faible maîtrise que l'on retrouve chez les locataires dont le statut permet d'agir sur

certain leviers en lien avec les usages mais qui se heurtent à des choix extérieurs. « *ici, le propriétaire remet le chauffage fin septembre, début octobre. Avec les fenêtres à l'Ouest, on règle en ouvrant, y a pas de thermostat... On voudrait pouvoir faire autrement mais ça ne relève pas de nous.* » (Foyer 5).

#### *Un principe moral de non gaspillage déjà existant*

Les capacités d'action apparaissent très limitées. A travers les descriptions fines de leurs organisations, les interviewés abordent des changements de pratiques déjà entrepris, des routines déjà bousculées, pour certaines totalement réformées. Certains insistent sur des rationalités déjà existantes qui visent à limiter les usages inappropriés et les consommations énergétiques excessives. A bien des égards, les injonctions et autres incitations à modifier les comportements laissent à penser qu'au sein des foyers, ce sont les attitudes énergivores et irresponsables qui l'emportent, qu'aucune réflexion n'a été entreprise. Ce que conteste l'ensemble des interviewés qui s'expriment sur ce point. « *Ce qui est très énervant, c'est que toutes les campagnes, tous les discours qu'on nous assène font comme si les gens faisaient n'importe quoi, n'avaient jamais réfléchi à la question. Evidemment, qu'on réfléchit à quoi faire pour économiser l'énergie, on fait des choses. (...) En fait, c'est très infantilisant comme façon de faire.* » (Foyer 19).

Le principal moral du non gaspillage se heurte à des réalités et des organisations quotidiennes pour lesquelles se pose la question permanente des marges de manœuvre encore existantes, en plus de celles déjà utilisées. La difficulté, pour les foyers, est d'identifier de nouvelles marges de manœuvre et d'actions, et d'évaluer ce qu'elles impliquent au niveau de l'organisation de la sphère domestique.

#### *Le Smart Grid n'est pas du tout anticipé par les foyers rencontrés*

La notion de Smart Grid reste très majoritairement inconnue du grand public. Dans une zone de déploiement expérimental du compteur Linky, quelques interviewés en ont entendu parler, savent vaguement que derrière ce terme, on parle d'efficacité énergétique, de distribution d'électricité mais ignorent tout du rôle des technologies informatiques ou encore du souhait d'optimisation de la production, de la distribution ou encore de la consommation. Les notions de pointe ou encore de lissage de courbe sont totalement absentes des discours. Et même pour les personnes un peu plus informées (notamment les foyers en EJP ou Tempo), les confusions sur la finalité du Smart Grid sont nombreuses.

A ce jour, le terme de Smart Grid est plutôt perçu négativement et suscite de la méfiance et de l'hostilité. En Touraine, les polémiques autour du compteur Linky sont encore présentes. Les inquiétudes se fondent sur deux registres distincts mais qui participent d'une même logique. Le 1<sup>er</sup> registre, c'est celui d'une technique très complexe qui tend à confirmer que l'on ne cherche pas à s'adresser aux habitants, encore moins à leur apporter des outils et solutions pour agir et réduire leurs consommations. « *si vraiment, c'est pour permettre de faire autrement, il faut un système simple et qui fasse sens, que tu puisses t'approprier facilement. De ce que j'en ai lu et compris, c'est très technique. Beaucoup n'y comprendront rien.* » (Foyer 14, Mr ingénieur en électronique). Le 2<sup>ème</sup> se construit sur la crainte d'une production de données personnelles importantes dont on interroge le devenir. Qui les détiendra ? A quelle

fin ? L'unanimité se fait sur la production d'un Smart Grid qui ne s'adresse pas, tout du moins pas à ce jour, aux destinataires finaux que sont les occupants des logements.

Enfin, le lien entre Smart Grid et préoccupations environnementales / écologiques n'est pas du tout établi. Les interviewés ne voient pas clairement en quoi la réforme d'un ensemble de comportements, voire une réforme plus radicale de l'organisation du foyer, via des effacements (une fois quelques éclairages fournis), s'inscrit dans la finalité Smart Grid. Autant, ils entrevoient le lien avec les discours sur la réduction des consommations d'énergie, autant ils ne saisissent pas la relation avec un réseau intelligent, à leur échelle microsociale.

### ► **Une relation complexe entre usages et systèmes techniques**

A travers les entretiens, et la réalisation d'inventaires techniques et de plannings journaliers, nous avons pu accéder puis reconstruire les combinaisons et les enchaînements entre les appareils techniques et les usages.

En termes d'organisation des recueils de données, nous sommes partis d'une semaine dite « type » et avons demandé aux interviewés de retracer très précisément, et dans un temps chronologique, les pratiques de l'ensemble des membres du foyer. L'évocation d'un moment particulier (déjeuner, repassage, détente, toilette...) a permis de repérer les matériels utilisés, ainsi que les conditions d'utilisation. Nous proposons ici deux exemples d'organisation qui permettent d'accéder aux usages, à leur imbrication ou à leur dissociation, et à l'impact potentiel sur les systèmes techniques utilisés.

*Un matin de semaine (mardi hors vacances) d'une famille avec enfants, deux parents salariés :*

- 6h30 : levé du père, préparation du petit-déjeuner (mise en route de la bouilloire, lancement du grille-pain, recours au micro-ondes pour chauffer le bol de lait de l'ainée des enfants (étudiante), allumage de la radio). Remise en marche du Wifi situé sur une prise multiple qui coupe tous les appareils (aucune veille) ;
- 6h45 : père rejoint par la mère et l'ainée des enfants. Fin du PD vers 7h00-7h15. Entre 7h00 et 7h30, arrivée des autres enfants scolarisés (nouvelle utilisation du micro-onde et du grille-pain, concomitamment) ;
- Entre 7h00 et 8h00 : utilisation des trois SdB de la maison (père : utilisation d'un rasoir électrique et mise en route d'une radio, mère et filles : utilisation de sèche-cheveux, recours à un convecteur d'appoint dans une des SdB. A l'étage des enfants, les préparatifs d'avant-école s'accompagnent de l'utilisation de radios, dans les chambres respectives et dans la SdB) ;
- 7h45-8h00 : un des enfants reste en bas et s'installe devant la télévision (15-20 mn)
- 8h00 : Madame et trois enfants quittent le domicile. Avant de partir, Madame met en marche le lave-linge après s'être assurée que Monsieur rentre bien le midi pour étendre le linge ou le mettre au sèche-linge (en fonction de la météo).

Pour cette famille, la description de l'organisation des autres jours montre à la fois les combinaisons répétées chaque jour de la semaine (exemple du PD) mais aussi celles qui varient selon la présence ou non des occupants. De même, cette description met à jour des relations entre les jours de la semaine. Madame ne travaillant pas le mercredi, il est fréquent que le mardi (cf description précédente) Monsieur, à son retour pour déjeuner, relance une lessive de façon à ce que le linge puisse être sec pour le repassage prévu le lendemain. Dans les cas les plus extrêmes, une autre lessive peut tourner le mercredi matin pendant que Madame repasse le linge présent dans la panier. Tous les enfants étant scolarisés le mercredi matin et Monsieur travaillant également, Madame parle de son « *moment d'intense activité intellectuelle* » mais aussi des activités qu'elle effectue en parallèle pour compenser la monotonie du repassage. « *généralement, j'en profite pour regarder un film que je n'ai toujours pas vu mais le plus souvent j'écoute la radio. Je fais toujours quelque chose en même temps. (...) Il arrive que pendant que je repasse, si je me suis laissée déborder, que je fasse tourner le lave-linge et le sèche-linge. Parce que je veux pas le faire plusieurs fois par semaine. (...) Et je bois un thé en même temps donc bouilloire en plus !!!* ». Dans cet exemple, l'organisation est calée sur un cycle hebdomadaire, des utilisations d'appareil le mardi en prévision des activités du lendemain. De même, dans cette famille très attachée à une alimentation saine, une partie des repas de la semaine à venir est préparée le WE, Monsieur et certains enfants rentrant les midis. Ces modes de vie peuvent correspondre à des formes de contraintes, choisies par la famille, qui impactent les conditions et les moments d'utilisation des appareils électriques.

*Un soir de semaine (hors vacances) d'une famille nombreuse, deux parents salariés :*

- 17h30 : 1<sup>ers</sup> retours des enfants au foyer (encadrement par la nourrice ou par la grand-mère), utilisation d'appareils électriques (grille-pain, micro-ondes) pour le goûter. Parallèlement, mise en marche de la télévision ou des ordinateurs portables ou de la console de jeux ;
- 18h00-19 h : retour du ou des parent(s) au domicile. Les enfants se succèdent dans la salle de bain (douche, chauffage d'appoint, sèche-cheveux) tout en écoutant la radio (système d'Ipod sur base). Des radios fonctionnent dans les chambres individuelles ou, pour les aînés, des ordinateurs ;
- 19h30 : Monsieur rentre de son footing (3-4 / sem.). Détour par la douche (mise en marche de la radio, chauffe-serviette) ;
- 19h30-20h30 : préparation du diner et diner (utilisation du four ou des plaques de cuisson, hotte d'aspiration, appareils électroménagers selon les mets cuisinés). Le temps de la préparation, la radio fonctionne dans la cuisine et les enfants sortis de la salle de bain attendent l'heure du repas en regardant la télévision) ;
- 20h45 : les parents s'installent devant un film (TV ou ordinateur), poursuivent un travail (ordinateur), parfois les deux en même temps...

Ce foyer dispose du système heures creuses – heures pleines, à partir de 23 h. Le lave-vaisselle est programmé pour se mettre en marche vers 2-3 h du matin (durée du cycle 2h30) journallement. La nuit est souvent le moment où les téléphones et autres matériels informatiques sont mis en charge. De même dans ce foyer, la mère décrit des mercredis de « *forte sollicitation de l'électricité* ». Les enfants aînés font très

souvent des gâteaux le mercredi AM. Outre le recours aux appareils électroménagers (bateurs, four, plaques de cuisson), ils descendent leur base Ipod pour écouter leur propre musique. Pour certaines réalisations, ils recourent à un ordinateur, installé sur le plan de travail de la cuisine et consultent des sites Internet spécialisés pour suivre –et étape par étape- le déroulé d’une recette.

Ces deux exemples d’organisation donnent accès à quelques moments structurants et à des chainages techniques. Deux en particulier ressortent. Le 1<sup>er</sup>, régulièrement abordé par les foyers, en particulier ceux avec enfants et parents (mère) salariée active, concerne les activités liées à l’hygiène et à la gestion du linge. On observe des chainages logiques tels que sèche-linge et derrière lave-linge mais aussi, des utilisations simultanées qui renvoient plus aux organisations et aux contraintes à gérer. De même, on observe que ces activités « mère » sont effectuées en même temps que d’autres qui rendent leur réalisation plus « agréable » (écouter la radio ou de la musique, visionner un film ou la TV, boire un thé ou un café...). Le 2<sup>ème</sup> correspond au moment des repas, notamment le petit-déjeuner : lancement de plusieurs appareils de préparation du PD, le plus souvent effectué avec un fond radio ou musical.

Les recueils qualitatifs permettent de reconstruire les organisations, les activités routinisées, les usages orphelins ou imbriqués les uns avec d’autres. Mais les organisations décrites sont rarement stables, et les interviewés s’empressent souvent de relativiser leur apparente stabilité en évoquant des imprévus, des changements qui remettent en cause l’équilibre trouvés. C’est souvent le point sur lequel ils construisent un discours d’incompréhension et de réserve à l’égard de demandes d’effacement.

### **III.2.c. La perception de l’effacement**

Les interviews réalisées permettent de reconstruire les organisations des ménages. Les moments et les activités décrits relèvent alors d’une forme de stabilité. En revanche, il s’avère plus complexe d’accéder et de modéliser l’instable, les arbitrages quotidiens. Les foyers décrivent des organisations qui reposent sur des ajustements quasi-permanents et des logiques d’adaptation. L’ensemble des stratégies à l’œuvre, souvent sans réelle et totale visibilité, complexifie les régulations au sein de la sphère domestique.

#### **► Les liens entre les usages ne sont pas mécaniques. Ils peuvent s’avérer contextuels donc dissociables**

Les situations décrites montrent que les organisations s’inscrivent dans des temporalités et des spatialités qui peuvent faire l’objet de re-négociations fréquentes, sans pour autant que la logique même de les contester et de les re-négocier soit systématique. Dès lors, les chaînes d’usages apparaissent trop aléatoires du point de vue des interviewés, effectives un jour mais pas un autre, pour envisager des formes d’effacement pérennes et impactantes sur le plan des consommations électriques.

### *Un lien entre repassage et télévision.*

Au sein d'un foyer, ce sont les relations entre acteurs autour du repassage qui viennent illustrer le caractère volatile et fragile des liens entre usages. Mère de 3 enfants, travaillant à 80 %, Madame B. (foyer 2) décrit le moment du repassage comme suffisamment rébarbatif et monotone pour « faire autre chose » en même temps. L'organisation décrite est susceptible d'être contrariée par des désaccords autour de l'usage de la télévision. « *le repassage, ce n'est quand pas quelque chose de très épanouissant, on est d'accord, alors généralement, je regarde des films, puisque nous pouvons tout avoir en décalé, parfois c'est la radio ou un CD mais le plus souvent, c'est le moment de rattraper un peu le retard sur des films qu'on voulait voir au ciné et qu'on n'est jamais allé voir... (...) Ce serait trop simple si ça se passait toujours comme ça car comme je m'installe dans le salon puisque j'ai tout à côté et que c'est là qu'il y a la télé mais aussi les box des enfants, si je regarde la télévision, ils viennent parfois râler parce qu'ils voulaient faire un jeu vidéo sur la Wii. Ils me tournent autour, c'est insupportable. Donc il m'arrive d'envoyer chacun dans sa chambre mais d'autres jours, pour peu que je sois fatiguée ou que je sais que ça va les calmer, parce qu'il fait pas beau et qu'ils ne peuvent pas aller dehors, je leur laisse la télé. Mais s'ils sont à la télé ou sur un jeu et que je repasse en écoutant de la musique à côté d'eux, là ils se plaignent du bruit de la centrale vapeur ! En fait, c'est des situations qui ne se ressemblent pas toujours. C'est pour ça que c'est pas aussi simple de faire des liens. Y a pleins de critères qui rentrent en compte.* ». Cette interviewée ne dispose pas de marges temporelles pour effectuer à un autre moment de la journée ou de la semaine l'activité repassage. Elle déclare d'ailleurs ne pas le souhaiter. L'organisation à l'œuvre à un moment est le résultat d'un type de négociation et de tractation spécifique dans un espace-temps social donné, qui n'est pas sans impact sur les usages électriques. Et force est de constater que la rationalisation des usages, et encore moins la dimension consommations d'énergie l'emportent dans les arbitrages opérés.

### *Un lien entre salle de bain et convecteur d'appoint.*

La description de l'utilisation d'un autre lieu chargé de symboles et d'imaginaires sociaux met également à jour la dimension contextuelle des usages. Au sein du foyer 8, les réflexions sur la maîtrise énergétique sont fréquentes, souvent construites autour des notions de confort et de bien-être. Résidents du Vieux Tours, dans une maison très ancienne aux performances énergétiques très relatives, les occupants du foyer 8, un couple et deux enfants, sont très attentifs au niveau de température. Les changements de saison, notamment l'arrivée de températures plus douces, correspondent souvent au moment où ils décident de couper le chauffage. Si l'exposition des pièces à vivre, au Sud et à l'Ouest, permet de conserver une température intérieure relativement agréable, il n'en est pas de même dans la salle de bain. Une fois le chauffage passé en mode « été », le couple recourt à un convecteur d'appoint qui chauffe la pièce le matin et le soir, plus d'une heure par jour. L'argumentaire se construit autour d'un dilemme entre température de confort, dans un foyer où les enfants ont 7 et 2 ans, et consommation d'énergie. « *c'est une période de l'année, on est entre deux saisons, qui nous pose problème. On a coupé le chauffage et vu l'inertie de la maison et la taille des murs, il n'est pas question qu'on remette le chauffe s'il n'y a que quelques jours de froid. Ça ne servirait à rien. Donc, on a ce radiateur d'appoint que l'on n'utilise que dans la salle de bain, ou quelques fois chez les enfants, juste avant le coucher. Dans la salle de bain, ça permet de gérer les quelques jours voire les semaines où c'est trop froid pour des enfants. Et même pour nous, on veut avoir*

*chaud dans notre salle de bain ! Mais c'est pas systématique, c'est vraiment quand on ressent le froid, le froid dans une pièce humide, c'est très désagréable. ». Le lien entre niveau de confort à maintenir et usage électrique est ici très explicite. Ce couple évalue de façon circonstanciée la solution qu'il estime la plus acceptable, avec comme priorité exclusive, le confort et le bien-être, notamment celui de ses enfants. La culpabilité, présente parfois, donne lieu à des procédés qui déstabilisent, à commencer par leurs auteurs. « parfois quand je trouve exagéré de mettre le radiateur ou qu'il fait pas trop froid non plus, j'utilise le sèche-cheveux... C'est-à-dire que je l'utilise pour moi et les enfants, mais eux c'est le soir, et le temps de les habiller ou qu'ils finissent de se préparer dans la salle de bain, je laisse le sèche-cheveux en marche. C'est comme un radiateur d'appoint, ni plus ni moins ! Mais quand je fais ça, je me dis que c'est quand même exagéré parce que je sais qu'il y a des résistances et tout ça, et puis je me dis que c'est sur peu de temps. Et puis, c'est vraiment en fonction de notre ressenti, c'est pas systématique. ».*

Ces deux restitutions d'organisations au sein de foyers attestent d'une stabilité relative des modes de fonctionnement et de régulations permanentes. L'accès aux négociations et aux compromis entre les membres permet de produire deux grands types de résultats. Tout d'abord, la confirmation que les arbitrages opérés le sont prioritairement sur des motivations humaines et sociales, voire affectives, également que la dimension de confort l'emporte sur celle de l'énergie. Ensuite que les organisations à l'œuvre rendent souvent les usages électriques associés instables, susceptibles d'être ajustés, déplacés, différés sans pour autant que se mette en place une autre organisation.

► **Des découplages d'usages possibles mais un effacement qui n'est pas pour autant certain**

Nous proposons ici trois types d'usages distincts qui permettent d'accéder à des utilisations d'équipements, en association ou en enchaînement. Pour chacun, que nous avons repéré lors de la partie de l'interview consacrée à la description d'une semaine ou de situations types, les interviewés ont été invités à envisager des réformes possibles. Comment, dans quel contexte, les alternatives apparaissent-elles possibles ? Qu'induirait certains effacements en matière d'activités, de gestion du foyer et pour chacun des membres présents ?

*La relation lave-linge – sèche-linge...*

L'activité liée à la prise en charge du linge constitue une source de consommation d'énergie importante qui s'avère propice aux discours et aux réflexions sur les réformes possibles. Les organisations décrites montrent que l'étape lavage et l'étape séchage s'enchaînent souvent rapidement dans le temps. Au sein de plusieurs foyers, les appareils peuvent fonctionner en même temps, voire être couplés avec un autre usage électrique, le repassage, et d'autres usages dits « secondaires » (télévision, musique, bouilloire...). On observe une chaîne d'usages dont la logique d'ensemble se fonde sur un système organisationnel circonstanciel et sous contrainte.

Tâche domestique majoritairement prise en charge par les femmes, ce sont elles qui s'expriment le plus sur ce qui est faisable, mais le plus souvent sur ce qui ne l'est pas ou très difficilement. A la question des possibilités d'effacer certains des appareils ou d'envisager autrement leur utilisation, elles évoquent plusieurs options

de réforme de l'organisation. L'une d'elle consiste à remplacer le séchage en sèche-linge électrique par un séchage sur étendoir à linge manuel. De manière très unanime, on ne relève aucune objection de principe, même si le linge sorti immédiatement du sèche-linge électrique est dit plus facile à plier « *parfois même, ça évite de le repasser. Il suffit de le contreplier* » (Foyer 9). Sur le principe donc, substituer l'un à l'autre n'est pas inenvisageable. Mais les arguments ne manquent pas pour expliquer qu'on ne le fait pas ou très occasionnellement.

**L'odeur** du linge mouillé, potentiellement désagréable, qui est avancée comme frein. « *L'odeur de la laine mouillée m'est insupportable. Ça me porte au cœur. Ça peut paraître stupide mais pour moi, c'est un vrai frein. C'est même pas que c'est fastidieux à étendre, c'est vraiment l'odeur du linge. Et comme y a déjà le sèche-linge et le lave-linge dans la salle de bain, je serais obligée d'étendre le linge soit dans une chambre, soit dans la pièce à vivre. C'est pas possible.* » (Foyer 1). L'odeur du linge tout juste sorti du lave-linge se conjugue avec d'autres inconvénients associés au séchage manuel.

C'est un **temps de séchage** que les interviewés trouvent plus long, et sur lequel ils disposent d'une moindre visibilité « *on sait qu'au bout d'un cycle d'une heure ou d'une heure trente, le linge il va sortir sec. Quand on l'étend, c'est plus difficile d'estimer parce que c'est lié à la température extérieure, à ce qu'on fait sécher. Un exemple, je le mets en journée, ici on coupe le chauffage en journée parce qu'il n'y a personne, je vais rentrer le soir, c'est pas sûr que le linge soit sec alors qu'au sèche-linge, je le sors, il est sec, je le plie.* (Foyer 2).

C'est aussi un **manque de place** qui complique le recours à un étendoir manuel, objet volumineux à placer dans le logement. Pour les foyers vivant en appartement ou pour ceux qui ne disposent pas de suffisamment de place, l'étendoir manuel implique de « coloniser » d'autres pièces associées à d'autres fonctionnalités ou accessibles à d'autres personnes que les membres du foyer. Outre les inconvénients résultant d'un manque de place « *ici, si je mets un séchoir, c'est obligatoirement dans la pièce à vivre, qui cohabite avec la cuisine qui n'est pas fermée... Il suffit qu'on cuisine quelque chose avec des épices ou une viande, tout ça, ça veut dire que le linge va prendre les odeurs de cuisine. Autant dire que ça ne sert à rien de le laver si au final, il prend les odeurs de cuisine en séchant* (Foyer 17) ; « *c'est quand même un objet très envahissant quand il est complètement déplié. La salle de bain, vu sa taille, c'est impossible donc c'est forcément dans une pièce à vivre ou dans le bureau. Ici on est cinq, H. elle court partout, tu vas retrouver l'étendoir à linge par terre donc non. C'est pas tant le fait de vouloir absolument sécher à l'électrique que de ne pas en avoir la possibilité ici* » (Foyer 19), les interviewés décrivent leur difficulté, voire leur gêne à faire cohabiter des objets et des activités antinomiques.

C'est enfin la **mise en visibilité de l'intimité** de la sphère domestique qui est avancée comme frein au recours à un système de séchage mécanique. « *le problème du manque de place, c'est que vous installez le séchoir dans une pièce à vivre où vous pouvez recevoir des personnes étrangères à votre foyer. Ici, je vais le mettre dans cette pièce, donc quelqu'un vient, comme vous aujourd'hui, et a la vue sur le linge. C'est pas que c'est gênant en soi mais voir les sous-vêtements par exemple, c'est quand même privé, c'est de l'intimité. Ça peut même être embarrassant si vous avez pas fait attention et qu'à un moment vous réalisez et vous vous dites « il a la vue sur mes sous-vêtements ! »* (Foyer 15) ; « *De ce qu'on aime montrer de soi, y a quand même mieux que des rangées de chaussettes ou encore des*

soutiens gorge ou des culottes... Quand ce sont des personnes que tu connais bien, des amis, admettons, et encore tes amis ne savent pas nécessairement quels sous-vêtements tu portes et tu n'as pas forcément envie qu'ils le sachent. Tu peux ne pas vouloir changer de mode de séchage par manque de place mais aussi pour ces considérations-là. (Foyer 5). Un foyer très engagé sur la thématique énergétique et environnementale explique la difficulté à trouver une organisation stable et fonctionnelle. Toute remise en cause de cette organisation s'apparenterait à la création de nouvelles contraintes. L'argument de l'« intimité » est mobilisé mais dans son cas, ce sont les contraintes liées aux recours à différentes modalités de séchage selon le linge qui sont avancées. L'équilibre trouvé autour d'une organisation décrite comme rationnelle serait remis en cause. « s'il s'agit d'opter pour différents systèmes de séchage en fonction du linge qu'on étend, ça devient ingérable, ça au sèche-linge parce que c'est du linge qui se montre pas, ça on étend parce que c'est pas gênant, ça devient compliqué. Dans ce cas, c'est sûr que tu mets tout dans le sèche-linge. Et la question de l'effacement est secondaire. » (Foyer 14).

Un autre argument revient régulièrement pour justifier les usages des lave-linge et sèche-linge. Cette fois, il ne s'agit pas de substituer un système manuel au système électrique mais du moment de recours aux appareils. Qu'il s'agisse de l'unique occupante du Foyer 3 ou des occupants du foyer 1, tous deux propriétaires d'un appartement dans un immeuble résidentiel ou encore du foyer 4, la **dimension sociabilité – relation de voisinage** influe sur les moments d'utilisation des lave et sèche-linge. Pour ces foyers, le lavage et le séchage doivent s'enchaîner, tout du moins être idéalement rapprochés dans le temps. Bien que disposant d'un système d'heures creuses – heures pleines (à partir de 23 heures), ils se refusent à utiliser leurs appareils le soir tard et encore moins la nuit. « j'ai de bonnes relations avec mes voisins et j'ai pas envie de les gêner. Je suis pas sûre qu'il entendrait mais je serais gênée de savoir qu'ils dorment pas à cause de la machine que j'ai lancée en allant me coucher. » (Foyer 3) ; « c'est vrai que ça pourrait être idéal certains jours car je la lance avant de me coucher, vers minuit, et le lendemain matin, j'ai le temps de mettre au sèche-linge et de sortir le linge avant de partir, ou le mercredi de le repasser tout de suite. Mais je ne le fais pas. Ce sont des vieilles maisons et on entend tout. Des fois, on les entend parler donc j' imagine qu'un essorage, ils l'entendraient. On ne les côtoie pas, on se dit juste « bonjour-bonsoir » mais ça me gênerait quand même de leur imposer ça. ». (Foyer 4) ».

Odeur, temps de séchage, manque de place, mise en visibilité de l'intimité, relations de voisinage, les freins à des usages différés ou des alternatives sont nombreux. Ce sont moins des oppositions de principes que des perceptions de l'hygiène et de l'intimité, ou des raisons objectives autour de la configuration du logement qui dissuadent, voire empêchent toute réforme des organisations en place.

#### *La relation grille-pain – cafetière ou bouilloire*

Les descriptions fines du moment du petit-déjeuner permettent d'accéder à de nombreux usages concomitants ou qui se succèdent dans le temps. Contrairement aux activités liées à la prise en charge du linge, pour lesquelles des alternatives sont évoquées, celles effectuées pour et lors des repas donnent lieu à des discours à la fois plus radicaux et plus contraints.

La question de l'effacement est apparue assez incompréhensible pour les interviewés qui situent les prises de repas à des moments très spécifiques et qu'ils associent à des habitudes mais aussi du plaisir. Dès lors, la réorganisation du petit – déjeuner, plus encore ce qui est interprété comme le renoncement à certaines étapes de vie importantes, suscite de l'agacement. *« en admettant que je renonce à mes tartines grillées, c'est pas pour autant que je vais me passer de mon bol de café !!! J'ai du mal à croire qu'un appareil en moins va changer beaucoup de choses. Et c'est un moment important donc tu ne penses pas à ça en priorité... »* (Foyer 7). Une mère de famille, très engagée dans des pratiques « responsables » sur le plan écologique, très militante auprès de ses proches, en priorité ses enfants, sur la gestion des déchets, de l'eau et de l'énergie, s'étonne que les réflexions en cours puissent un jour aboutir à des options aussi radicales. La problématique de l'effacement correspond de son point de vue à des dérives et à une ingérence dans les modes de vie. *« Le problème là, c'est que sous prétexte de faire des économies d'énergie, on en vient à des situations complètement absurdes et autoritaires. Je me vois bien dire aux garçons « les garçons, désolé mais ce matin, ce sera tartines non grillées parce qu'on n'utilise pas le grille-pain parce qu'il faut réduire notre consommation ! ». Ils vont me regarder avec des yeux comme ça ! Et la suite, c'est quoi ? « Au fait, ce matin, vous vous ferez votre jus d'orange manuellement car on ne peut pas utiliser l'appareil à jus d'orange électrique ?! ». Ça devient difficile à imaginer. »* (Foyer 9).

L'effacement n'a jamais été abordé directement lors des entretiens. Jamais les interviewés se sont entendus demander s'ils pourraient envisager de renoncer à griller leurs tartines ou encore à différer la réalisation d'un plat culinaire. Ils n'ont été interpellés que sur leur organisation et sur ce qu'ils pourraient modifier, différer. Mais d'eux-mêmes, ils analysent ces questions sous l'angle de la contrainte et de la dégradation de leurs modes de vie. Outre la difficulté à se projeter sur des moments de repas rythmés par des incapacités à recourir à certains appareils, les personnes interrogées entrevoient les mêmes incidences sur leur vie sociale.

C'est tout d'abord une femme retraitée, vivant seule, qui aime recevoir des amis. *« Je ne me vois pas dire à des amis qui passent à l'improviste « ça tombe mal, je vous offrirais bien un thé mais c'est pas possible car je suis sur une période rouge, je vais plutôt vous offrir une boisson froide ». Je ne sais pas comment ils le comprendraient »* (Foyer 6). C'est ensuite ces couples pour qui les dimensions de sociabilité et de convivialité priment sur les aspects énergétiques. Ici, les notions d'effacement sont interprétées comme une remise en cause potentielle des modes de vie. *« Si j'ai un rôti à mettre au four à 19 h parce qu'on reçoit des amis, je vais pas me dire « on est en pleine période de pointe, comment on fait ? », la question, je ne me la pose même pas, je fais cuire mon rôti et puis c'est tout. Si on commence à gérer des charges comme ça, on se coupe de tout le monde. (...) les solutions aux problèmes d'énergie peuvent pas être réglées comme ça. »* (Foyer 11) ; *« là, nous parlons de recevoir des gens dans les règles de convivialité. Nous n'allons quand même pas leur dire « ce soir, ce sera repas froid parce que nous nous n'utilisons pas certains appareils électriques » ou encore dire à la voisine avec qui tu t'entends bien « je vous invite à boire un café mais on le prend chez vous parce que moi, c'est pas possible dans les deux heures qui viennent ! »* (Foyer 2).

Les usages associés aux nouvelles technologies informatiques et numériques ont été longuement abordés. L'importance des équipements dans les foyers en outils informatiques, en système Internet, en box et autres consoles de jeux explique leur mobilisation dans les discours. Ils sont aujourd'hui très présents dans la plupart des foyers. Mais ce sont également deux autres considérations qui conduisent les interviewés à les aborder. Une première d'ordre « technique », une seconde liée au public à qui ils se destinent pour partie.

Bien qu'hétérogènes sur de nombreuses variables (âge, PCS, ...), les foyers que nous avons interrogés ont en commun de disposer de multiples appareils électroniques, informatiques, en réseau. Ces appareils sont la plupart du temps solidaires les uns des autres, l'allumage de la box donne souvent lieu derrière à celui d'une télévision ou encore d'un ordinateur ou d'une tablette, voire d'une imprimante ou d'un scanner. A la question similaire sur l'utilisation de ces appareils et sur les conditions possibles de changements, aussi bien en termes de moments que de fréquence, les interviewés répondent que l'interconnexion des appareils les uns avec les autres ne permet aucune demi-mesure. *« je suis bien obligé d'allumer la box pour utiliser mon ordinateur. C'est pareil pour les enfants, c'est compliqué d'utiliser la Wii sans la télévision. Je vois pas comment faire autrement que de les mettre tous en marche. Il me faut l'accès Internet pour tout ce qui est en ligne, sur l'ordinateur ou la tablette. Si je veux utiliser l'imprimante, c'est que j'ai un ordinateur en marche, etc etc. Là, je vois pas comment en utiliser un sans que les autres soient allumés. »* (Foyer 14). Ce verbatim montre que la réflexion autour des usages de la technique existe. L'interviewé qui s'exprime ici, pourtant très à l'aise avec les nouvelles technologies, se montre circonspect tant l'interconnexion des systèmes évoqués ne lui semble pas permettre des utilisations d'appareils pour partie différées. En témoigne la remarque sur l'imprimante et l'ordinateur, ou encore celle sur les consoles et la télévision...

Pour un des interviewés exerçant son activité professionnelle (développeur d'interfaces Internet) pour partie à son domicile, il ne pourrait être question d'effacer ou de différer des appareils qui fonctionnent en réseau. Ce sont ici les contraintes professionnelles et les échéances à tenir qui déterminent les usages dans le foyer, donc les sollicitations du réseau électrique. *« Moi, qu'on essaie de voir ce qu'on peut faire à un autre moment ou faire autrement, ça me paraît pas délirant. Par contre, la question, c'est celle de la marge de manœuvre. Moi, j'ai des clients à qui je dois remettre la proposition tel jour. Si je suis à la bourre ou que j'ai pas avancé comme je voulais, je vais utiliser mon système sans me dire « tout tourne, faudrait éteindre ça ou ça, ou le faire plus tard ». Ce sera pas ma priorité du moment. Moi, ça arrive que tout tourne toute la nuit. Pour ce qui est du travail, c'est très difficile de se dire « la consommation d'énergie prime » ». »* (Foyer 7).

Les usages informatiques et électroniques sont eux-aussi abordés sous l'angle du relationnel. Les moments libres pendant lesquels sont autorisés les jeux vidéo résultent de négociations ou de contreparties entre parents et enfants. Pour cette mère qui souhaite obtenir un temps calme ou ce père qui désire partager un moment avec ses enfants, les questionnements autour des consommations d'électricité sont relégués dans les préoccupations. *« Ça m'arrive de les occuper, comme ça pour les calmer en les autorisant à faire un jeu sur console, un mercredi ou un jour où il*

*ne fait pas beau et qu'on ne peut sortir. Dans ces moments-là, on ne se dit pas « mais tout ça, ça consomme ». Dans ces moments, ce qui importe, c'est les occuper et les tenir, pas de savoir si la consommation est au plus haut... » (Foyer 19) ; « si un WE ou pendant des vacances, on est en train de faire un jeu par exemple, même si je sais que tout le monde est à son domicile et qu'on me dit qu'il y a un pic de consommations, parce que ce sont des sujets qui m'intéressent, je vais pas m'arrêter et dire à mes enfants « on suspend une heure et on reprend », c'est incompréhensible. Les décisions ne se prennent jamais sur ces critères-là, c'est pas aussi radical » (Foyer 14).*

Les organisations sociales à l'œuvre, telles que décrites ici, réduisent les gisements d'économie d'énergie potentiellement existants. Pour les interviewés, les organisations obéissent à d'autres logiques qu'économiques et énergétiques. Construites sur des exigences fortes en matière de modes de vie et de confort, mais aussi de sociabilité, obéissant à des contraintes extérieures, elles apparaissent difficilement réformables, ou au prix de renoncements trop préjudiciables pour être durablement envisagés.

*En conclusion...*

Ces récits de pratiques montrent que, pour les interviewés, **l'effacement ne se limite pas à un choix ou à un calcul technico-économique**. Il s'encastre ou vient en percussion avec des organisations en tension établies sur des arbitrages et sur une stabilité toute relative. Des résultats que l'on peut synthétiser de la manière suivante :

- Différer et/ou effacer l'usage de certains équipements est perçu comme une contrainte et un empiétement sur la liberté d'action dans la sphère domestique. L'effacement interroge par ailleurs la capacité à agir et les marges de manœuvre existantes. Les organisations domestiques décrites apparaissent déjà fortement contraintes. Sachant que les tâches ménagères et la prise en charge des enfants relèvent très majoritairement des femmes, ce sont elles qui expriment le plus de crainte à des réformes organisationnelles et à des effacements qui mettraient à mal l'équilibre souvent précaire trouvé. Les réserves émises doivent être comprises comme un refus d'une charge supplémentaire <sup>8</sup> ;
- La présence d'enfants au sein du foyer influence le choix des équipements, in fine des activités, différables voire effaçables. Pour les interviewés, les arbitrages s'opèrent selon les contraintes à gérer et le niveau de tolérance aux transformations possibles. Par exemple, les familles avec enfants, dont certains de très bas-âge, font une distinction entre maintenir l'utilisation d'un chauffe-biberon électrique –aucune négociation ni réforme envisageable– et la régulation des usages des consoles de jeux et de la télévision. De même, l'hygiène et

---

<sup>8</sup> Lors des entretiens menés en présence du couple, ce sont elles qui se sont exprimées le plus, redoutant d'être les « grandes perdantes » d'évolutions dans la gestion de la sphère domestique dont elles assument la plus grande part.

la gestion du linge de corps en lien avec les enfants donnent lieu à des discours et à des possibilités de réforme relativement hétérogènes ;

- Les définition et représentations associées à la notion de confort structurent fortement les lignes de partage. En matière d'usages électriques, et plus encore de température du logement, les arbitrages se font entre les jours / temps de présence au foyer –moments pour lesquels des effacements apparaissent compliqués- et les périodes d'absences plus longues durant lesquelles l'effacement est plus facilement envisageables.

Des refus clairs d'effacer les usages en lien avec les dimensions « *sociabilité et convivialité* » (recevoir autour d'un repas ou d'un café, faire la cuisine...) et « *loisirs* » (en particulier autour des équipements multimédias). Les demandes / attentes d'effacement viennent rompre avec les formes de spontanéité et de sociabilité auxquelles les interviewés se montrent très attachés.

## **IV. Les *smart grids* comme moyen de pilotage de la décentralisation énergétique**

### **IV.1. De l'effacement des usages vers la régulation du trafic énergétique**

---

L'efficacité de l'effacement par un contrôle des smart grids est incontestable si on se restreint à un problème de pointes journalières. Dans un contexte de pénurie de capacité, à l'image du contexte français actuel, l'effacement des usages électriques hors chauffage sur une durée d'environ une heure lors des pics matinaux et nocturnes permet de réduire les consommations de l'ordre de 2 à 5 %, ce qui représente une quantité d'énergie assez faible mais un délestage qui peut s'avérer précieux pour des opérateurs globaux occupés à piloter les plus infimes fluctuations des charges (et qui revient, à l'échelle nationale, à libérer tout de même plusieurs dizaines, voire des centaines, de MW). C'est en effet uniquement dans cette configuration que l'effacement paraît utile alors que le gain apporté par la technologie paraît plutôt faible à des échelles plus locales.

Les niveaux d'autoconsommation urbaine de la production des BEPOS et des bâtiments existants qui pourraient être équipés de panneaux photovoltaïques ne se modifient guère grâce à un jeu d'effacement des usages. Les smart grids, vus comme des systèmes de modulation de la demande, n'apportent quasiment aucun bénéfice puisqu'ils permettent d'augmenter d'à peine 1 % la part des énergies renouvelables fatales (principalement photovoltaïques) consommées localement par le secteur du logement. Leur efficacité, par rapport à un tel objectif, n'excèdent pas 4 %, ce qui demeurent dérisoire et scientifiquement non significatif dans un exercice de simulation tel que celui entrepris dans cette recherche. Bien entendu, ces quantités extrêmement basses ne signifient nullement que les smart grids constituent des technologies totalement inopérantes, elles témoignent uniquement que le contrôle des quelques usages qu'elles autorisent ne peut être envisagé comme un levier actif pour maximiser l'exploitation directe des ressources renouvelables et ce, que l'on se situe dans une configuration top-down ou bottom-up.

Mais ce n'est pas du strict point de vue de l'autoconsommation ni de l'effacement que cette recherche apporte le plus d'enseignements. En prouvant que les situations d'autoconsommation du point de vue sectoriel et territoriales sont fréquentes (les BEPOS comme les bâtiments composant les agrégats urbains peuvent consommer, sans stockage et pour un scénario d'exploitation systématique des toitures en panneaux photovoltaïques, près de la moitié de leur besoins électriques, cette recherche démontre que des échanges endogènes au territoire sont possibles et loin d'être négligeables. En effet, les zones existantes pourvues de surfaces éligibles importantes et de faibles besoins électriques deviennent de fait, aux moments de surproduction du point de vue de leur besoin propre, des zones d'approvisionnement pour celles moins bien dotées en surfaces de captation solaire. On remarque, dans l'application faites pour l'agglomération de Tours, que les zones périphériques sont, plus fréquemment que celles du centre, en situation de surcapacité, et qu'elles peuvent fournir de l'énergie aux zones les plus centrales ou à

d'autres secteurs d'activités (notamment le tertiaire). Dans un tel scénario, les smart grids pourraient être plus destinés à l'organisation du transport de ces zones de la ville en surcapacité vers les zones ou les secteurs d'activités en sous-capacité qu'à la modulation de la demande. Dans ce jeu interzone et/ou intersectoriel, les smart grids constituent des technologies qui favorisent significativement l'autonomie sans stockage des échelles supérieures (l'ensemble du territoire), sans néanmoins l'atteindre complètement, en régulant le « trafic » énergétique entre agrégats urbains.

#### **IV.2. Existe-t-il une échelle territoriale optimale qui maximise le gisement d'effacement des usages électriques ?**

---

La réponse à cette question est clairement négative. Les usages spécifiques de l'électricité réputés modulables n'étant nullement dépendant de la structure bâtie, on observe, quelles que soient les échelles, une certaine homogénéité des profils de consommations (en termes de courbe de charge) et des possibilités d'effacement. En clair, l'indépendance entre les échelles des agrégats urbains et le gisement d'effacement s'expliquent par des modalités d'occupation des logements insuffisamment contrastées d'un point de vue spatial pour mettre en évidence des effets d'échelles, surtout lorsqu'on se limite à des usages qui discriminent peu les ménages entre eux (ECS, lave-linge et sèche-linge, lave-vaisselle). En effet, quelle que soit l'échelle et le mode de découpage du territoire, les courbes de charges demeurent similaires et établissent le même type de foisonnement.

Cette assertion démontre que la configuration top down n'est pas plus appropriée pour maîtriser la forme des foisonnements qu'une configuration bottom-up. Au contraire, les effets supposés d'une gestion de grands nombres de logements, qui légitiment généralement la conduite délocalisée de l'effacement, demeurent relativement minces puisque l'homogénéité des profils d'usage apparaît relativement tôt dans le territoire (à des échelles de quelques centaines de bâtiments) et engendre assez rapidement des effets de foisonnement. Pour être plus précis, les agrégats urbains, quel que soit le mode de découpage du territoire, sont identiquement hétérogènes pour engendrer des foisonnements fortement similaires entre eux et contenir des gisements équivalents d'effacement ; et il n'est donc pas indispensable qu'ils soient pris comme des entités de très grande taille et composés de plusieurs milliers de logements comme le suppose généralement une configuration top down.

Là encore, la recherche montre que les smart grids peuvent être utiles à l'échelle locale pour organiser l'effacement de certains usages, notamment pour réduire les pointes journalières et diminuer à la marge les capacités d'une production thermique de l'électricité. Elle démontre enfin que les logiques de maîtrise des pointes à l'échelle locale sont identiques à celles adoptées actuellement à l'échelle nationale.

### **IV.3. Le renversement de raisonnement lié au déploiement des smart-grids et au développement du BEPOS**

---

Pour résumer, l'effacement rendu possible par les smart grids peut être regardé comme un accessoire mineur dans le cadre d'une maîtrise de la structure de la charge énergétique locale. Les gisements qu'ils offrent sont bien trop ténus pour accroître significativement la part consommée d'énergie renouvelable d'origine solaire ou éolienne produite localement, et n'ont de pertinence que dans le cas d'une réduction marginale des pointes journalières, cette réduction étant rarement prioritaire dans une politique territorialisée de l'énergie. Les smart grids doivent donc être plutôt examinés à l'aune des échanges énergétiques entre les agrégats urbains et les secteurs d'activité : de ce point de vue, la technologie permet d'ordonner les flux entre les zones et les secteurs d'activités et de minimiser le recours au stockage, à la production extraterritoriale ou à la génération thermique. C'est en ces termes qu'ils peuvent être envisagés par les acteurs locaux : la technologie intervertit les termes du raisonnement actuel en priorisant l'épuisement de la production locale à travers une distribution intra-territoriale et en considérant les importations ou les productions thermiques comme des éléments d'ajustement ou d'appoint. Ce raisonnement s'emboîte bien entendu avec les échelles jusqu'à atteindre des dimensions supranationales et reprend, d'ailleurs, le format des échanges en cours aujourd'hui entre les pays européens (chaque pays produisant dans la mesure de ses capacités et important une partie de ses besoins en fonction de son déficit capacitaire et de l'état du marché).

Il faut néanmoins souligner qu'un tel renversement des priorités dans les modes de consommation de l'énergie produite localement a des effets directs sur les propriétés des infrastructures dédiées au transport : en outre de favoriser les connexions directes des centres de production aux réseaux locaux, la priorisation de l'autoconsommation territoriale (que la production provienne des BEPOS ou non) modifie substantiellement la fonction des infrastructures de transport de l'énergie en bouleversant la nature et la direction des flux énergétiques qui les traversent. En effet, les réseaux physiques, principalement de transport et de distribution en moyenne et basse tension, doivent acheminer des flux variant continuellement tant en termes directionnels (entre tous les agrégats) qu'en termes d'intensité (en fonction des niveaux de production liés aux conditions météorologiques pour le solaire et l'éolien), ces variations pouvant découler sur un réajustement significatif des besoins de maillage des réseaux électriques urbains (en exigeant d'eux qu'ils soient d'une plus grande connectivité) et un renouvellement des systèmes de régulation des niveaux de tension (afin d'éviter au mieux les situations de sous et surtension).

Selon un tel scénario de mise en œuvre, les smart grids joueraient alors un rôle de « dérivateur » automatique et dynamique (et non pas intelligent) de la production locale selon plusieurs contraintes : la production d'un agrégat, sa proximité spatiale à un agrégat déficitaire et la capacité de transport du réseau de distribution tant en terme d'intensité qu'en termes de connectivité. La recherche Toaster montre, indépendamment de ces contraintes techniques, qu'un découpage du territoire en entité de taille plutôt réduite (des quartiers de quelques centaines de logements) est suffisant pour satisfaire ce type d'optimisation et maximiser l'autonomie des territoires en minimisant le recours au stockage.

#### **IV.4. Le BEPOS et les smart-grids comme moyen pour territorialiser la question de la transition énergétique : de la maîtrise de la consommation d'énergie vers la capacité de la production locale et du transport**

---

Les collectivités territoriales se sont jusque-là emparées de la question énergétique sous une forme comptable. Depuis quelques années, notamment à l'occasion de la mise en place des PCET, elles ont appris à établir des bilans grâce à des méthodes simplifiées (de type 3CL ou RT analogues à celles destinées au DPE) qui envisagent la consommation ou la production d'énergie comme des quantités, des stocks, établies sur une base annuelle (à l'image de la comptabilité économique). En identifiant combien les territoires consomment ou produisent de l'énergie par an, les documents élaborés ne peuvent de fait dire comment les territoires consomment ou produisent cette énergie pendant cette durée. Or, les dispositifs matériels de production et de régulation de l'énergie, introduits dans le débat comme des solutions répondant aux enjeux définis par les stratégies locales, sont dimensionnés autant en fonction de la quantité d'énergie que l'on désire consommer ou produire que des fluctuations de puissances tout le long de l'année. En se focalisant sur la question de l'énergie, les collectivités, comme les réglementations, ont négligé celle des puissances, ces dernières étant les seules quantités permettant d'explicitier l'articulation entre les objectifs énergétiques des PCET ou ceux des stratégies locales et les dispositifs techniques.

Ce raccourci (passer directement de la question de l'énergie aux réponses techniques) engendre une confusion dans les débats en enflant le pouvoir des systèmes technologiques et, très souvent, en favorisant la superposition et non l'intégration de ces derniers. Ce processus est flagrant dans le cas des smart grids et la production des BEPOS : en priorisant le problème de l'énergie sur celui de la puissance, les smart grids sont essentiellement vus comme des solutions pour gagner de l'effacement afin de renforcer l'autoconsommation (alors que, comme nous l'avons montré, les gisements à ce niveau sont plutôt faibles) ou comme des éléments obligatoirement couplés à des procédés de stockage. Les systèmes de stockage deviennent alors des dispositifs supplémentaires et artificiellement indispensables qui complexifient l'assemblage technique au point de rendre ce dernier totalement incompréhensible, notamment pour les représentants des collectivités territoriales. De tels assemblages deviennent de fait quasi autonomes et sont délégués à des acteurs industriels dans l'incapacité de garantir le niveau de performance initialement promis. Enfin, sachant que chaque dispositif appelle pour son fonctionnement de l'énergie et que les assemblages accentuent encore cette consommation, il devient impossible de déterminer, et encore moins de garantir, le niveau de rendement de la solution préconisée.

Or, les smart grids, lorsqu'ils sont regardés comme de simples moyens de régulation automatique des échanges, et donc comme des procédés de « dérivation » dynamique des flux énergétiques, peuvent satisfaire, sans faire appel au stockage, aux objectifs initiaux d'une plus grande autonomie des territoires et d'une exploitation directe des ressources locales. Les BEPOS dans ce cadre deviennent des points supplémentaires de production d'énergie renouvelable qui s'intègrent dans le système énergétique territoriale. La question énergétique passe ainsi d'une analyse comptable à une gestion dynamique du trafic entre points de production et

points de consommation en mettant en exergue les propriétés matérielles des infrastructures.

Pour les collectivités, l'enjeu est donc de matérialiser les flux énergétiques en dépassant l'expression comptable « déspatialisée » des analyses et des objectifs en pratique aujourd'hui, et en proposant une définition explicite des conditions matérielles et spatiales des échanges. Cette transition méthodologique de l'analyse comptable à l'analyse dynamique conditionne la technologie (et non l'inverse) et devance la question de la transition énergétique. Il s'agit alors de savoir quels échanges énergétiques veut-on favoriser dans le territoire avant de savoir quels dispositifs techniques seront mobilisés. Or, la précipitation vers des solutions techniques, surtout lorsqu'elles sont polymorphes comme les smart grids, ne permet pas d'éclairer la décision sur ce dernier point.

# V. ANNEXES

## V.1. Le module toaster système

### V.1.a. Module t-Geometry

Une fois la maille spatiale définie (bâtiment, îlot, quartier, IRIS, etc...) et la fonction objectives définie (moyenne journalière des consommations, courbe « tunnel », production décentralisée, etc...), une routine d'optimisation permet de définir les ordres d'effacement qu'il serait possible de mettre en place pour parvenir à rapprocher le plus possible la courbe des consommations et la fonction objective.

La création de l'outil d'optimisation s'est faite suivant un certain nombre de contraintes fixées par les différentes limites techniques et par nous-mêmes :

- Pouvoir optimiser la gestion des composantes du réseau suivant une multitude d'objectifs (baisse des appels de charge à la pointe, lissage de la courbe d'appels de charge journalier,...)
- Pouvoir optimiser la gestion d'un territoire suivant des contraintes situées à différentes échelles
- Optimiser la gestion du réseau sur des échelles de temps allant de l'heure à l'année (pour de la planification d'investissement par exemple)
- Limiter les temps de calcul de l'outil pour en faciliter son utilisation et le rendre opérationnel

Ces contraintes ont ainsi dicté l'ensemble des choix réalisés au cours de la création de l'outil.

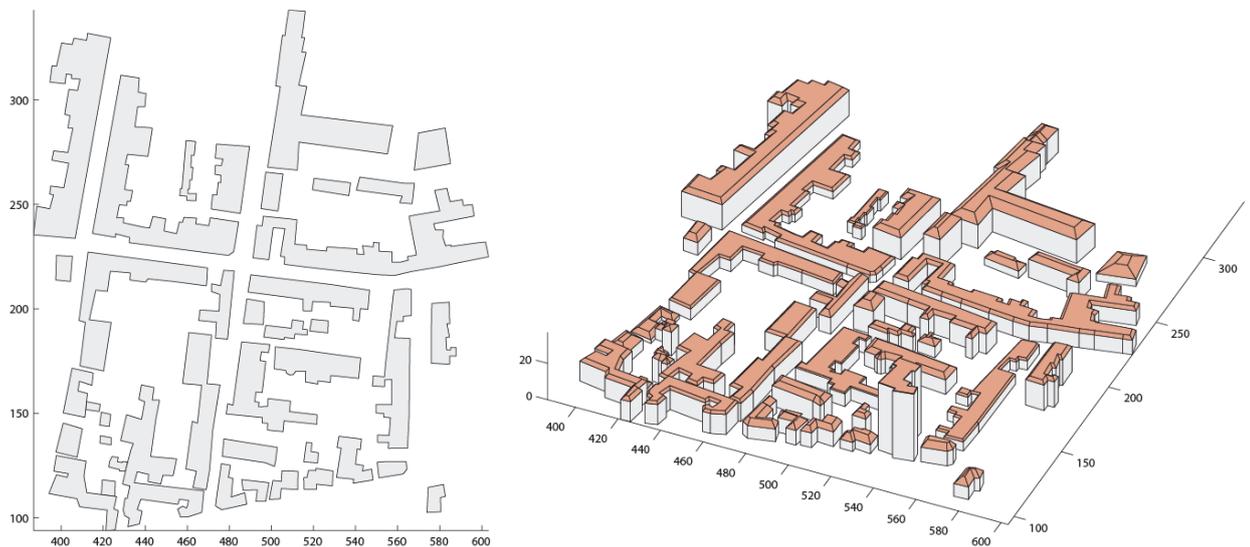
Les consommations qui ont été définies dans les modules t-Heat et au moyen de CHARTER® serviront de base aux simulations d'effacement. On se placera toujours dans le cas des usages différables : il s'agit alors de différer l'usage dans le temps lorsque cela ne nuit pas trop au consommateur. L'usage est donc peu ou pas dégradé. On trouvera dans cette catégorie les usages correspondant à des besoins non immédiats, comme l'utilisation de la machine à laver (lave-linge et sèche-linge), du lave-vaisselle et du ballon d'eau chaude (production d'Eau Chaude Sanitaire, ECS), dont l'usage peut généralement être reporté de quelques heures sans porter atteinte au confort de leurs utilisateurs (pour l'ECS, l'inertie thermique des ballons permet d'envisager ce décalage de consommation).

Ces usages sont caractérisés par une utilisation ponctuelle ou relativement concentrée dans la journée, ce qui autorise que l'on puisse déplacer leur consommation dans le temps.

Ce module est principalement dédié à la fabrication d'une base de données urbaine ou territoriale conforme au calcul énergétique à partir des données standards disponibles en France. En effet, le calcul à l'échelle urbaine est généralement (si ce n'est toujours) réalisé à partir des données statistiques de l'INSEE (principalement le RGP) sans tenir compte de la géométrie effective des bâtiments. Cette dernière est construite sur la base d'une démarche typologique grâce des hypothèses « expertes » sur la forme architecturale du bâti. Or plusieurs bases de données géographiques sont aujourd'hui disponibles et fournissent assez précisément la géométrie constatée sur le terrain des tissus urbains (notamment la BD TOPO de l'IGN). Ces bases de données décrivent généralement la géométrie des îlots en deux dimensions

(en plan) et indiquent sous une forme numérique (attribut) leur hauteur. Couplées aux données de l'INSEE relatives à la période de construction, il est ainsi envisageable, à partir d'hypothèses moins lourdes que dans une démarche exclusivement typologique, de reconstituer la morphologie des îlots en intégrant celle des toitures et de produire ainsi la forme urbaine en trois dimensions (dimensions indispensables pour calculer les besoins énergétiques de chauffage et le rayonnement solaire sur l'enveloppe du tissu urbain).

Le module toaster – Geometry reconstitue la volumétrie des îlots en considérant les toitures spécifiques de chaque période de construction, à partir d'un algorithme d'optimisation géométrique. Il considère ainsi qu'un îlot appartenant à un IRIS possède une probabilité d'appartenir à une période de construction, cette probabilité étant confondue à la part qu'occupe cette période dans l'effectif de l'IRIS mesuré par l'INSEE. Appartenir à une période de construction revient, d'un point de vue géométrique, à hériter d'une toiture de pente donnée, l'algorithme cherchant la forme de toiture optimale respectant cette pente pour la géométrie de l'îlot considéré.

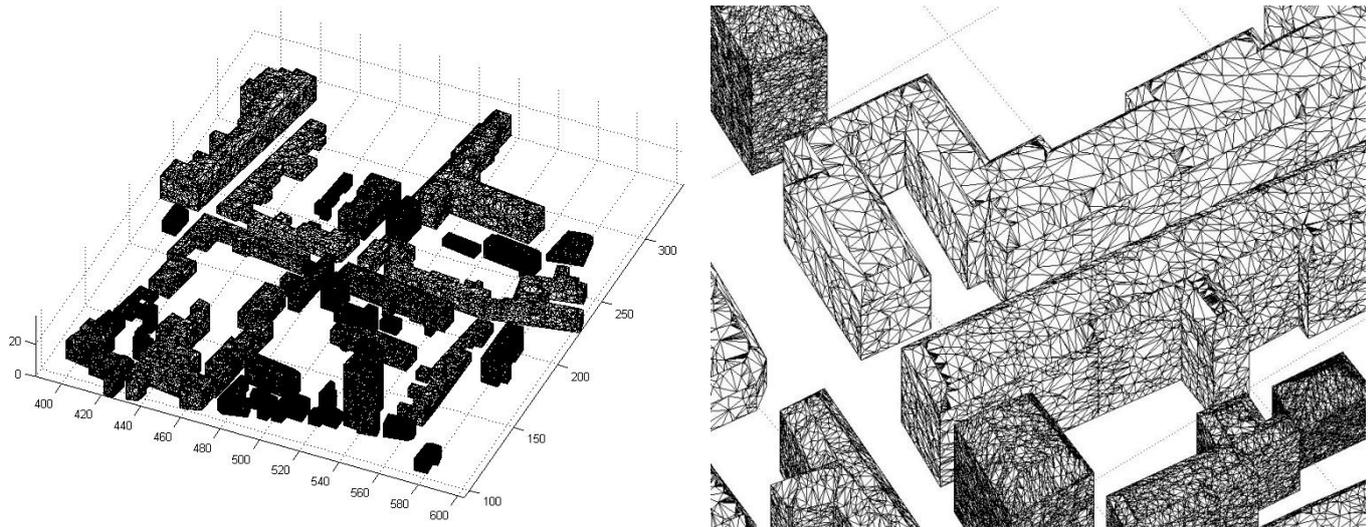


Données initiales de la BD TOPO

Transformation géométrique à partir de toaster – Geometry

**Figure 53 : Construction de la géométrie des îlots à partir de t-Geometry**

A la suite de cette reconstitution, le module t-Geometry construit son propre maillage (décomposition des faces composant l'enveloppe du tissu urbain) afin de servir le calcul de rayonnement solaire réalisé dans le module t-Solar. A l'instar de la plupart des modèles commerciaux, ce maillage a la particularité de discrétiser le tissu urbain de manière aléatoire avec une résolution donnée afin d'économiser au mieux les temps de calcul. Ce sont tout ou partie de cette ensemble de triangles (dits de Delaunay) résultant de ce protocole de discrétisation qui seront analysés du point de vue du rayonnement solaire dans le module t-Solar.



**Figure 54 : Maillage à partir de toaster – Geometry**

#### V.1.b. Module t-Systems

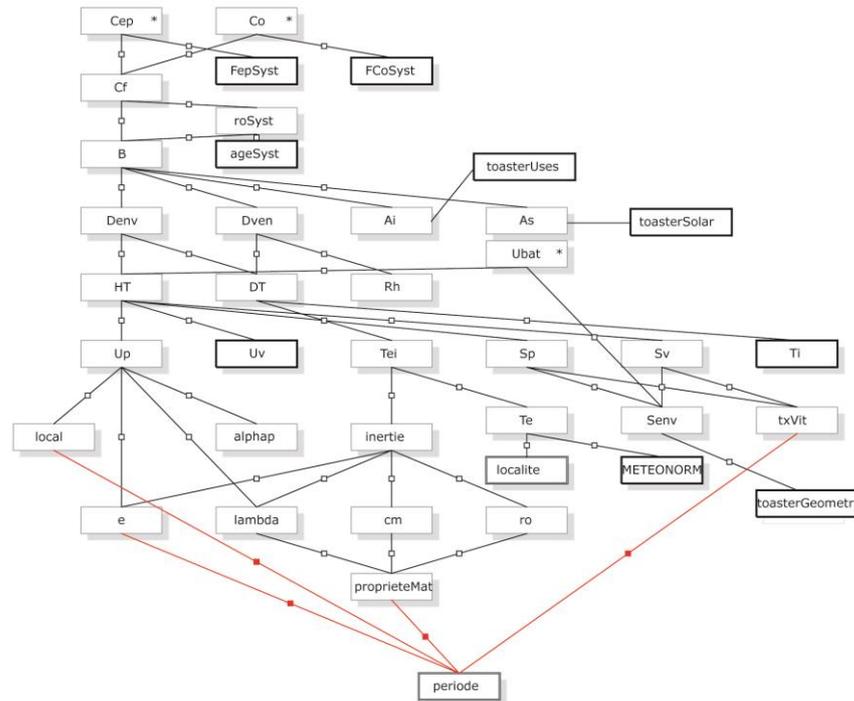
Pour construire l'architecture du modèle fonctionnel Toaster, le consortium procède par additions successives de sous-systèmes sectoriels dans un modèle intégré obéissant aux propriétés topologiques de la théorie des graphes. La démarche de modélisation consiste à implémenter, selon un formalisme unique, des modèles développés séparément, à partir de l'écriture explicite du jeu d'équations qui concerne chaque élément du calcul énergétique (chauffage, rayonnement solaire, consommation électrique) : chaque variable représente dans ce type de modélisation une « brique » du sous-système, et chaque équation, le « mortier » les reliant. Un sous-système sectoriel (bâtiment, comportement, réseau de transport de l'énergie, etc.) représente à son tour, dans la phase suivante d'intégration et selon une procédure identique, une brique qui s'articulera à d'autres sous-systèmes bâtissant ainsi un ensemble dont on cherche à établir l'auto-cohérence<sup>9</sup>. La structure d'un tel ensemble donne de cette manière un graphe connexe reliant les variables du système entre elles par des relations fonctionnelles (dans le sens de fonctions mathématiques). C'est la topologie même du système ainsi établie qui permet de vérifier d'emblée l'auto-cohérence du modèle, principalement, sur la base de vérifications relatives à l'absence de redondance et de circularité, et à l'assurance d'une complète connexité.

Dans une telle démarche, l'algorithmique générale du modèle est organisée selon un ordonnancement respectant rigoureusement les propriétés topologiques du système : l'exploration heuristique du graphe (notamment celui des chemins entre

<sup>9</sup> Dans le cas où ce jeu d'équations est trop difficile à implémenter, on entend par sous-système un module de calcul prédéfini, par exemple Comfie-Pleiade, dont on articule de manière formelle les inputs et les outputs avec les variables des autres sous-systèmes sectoriels.

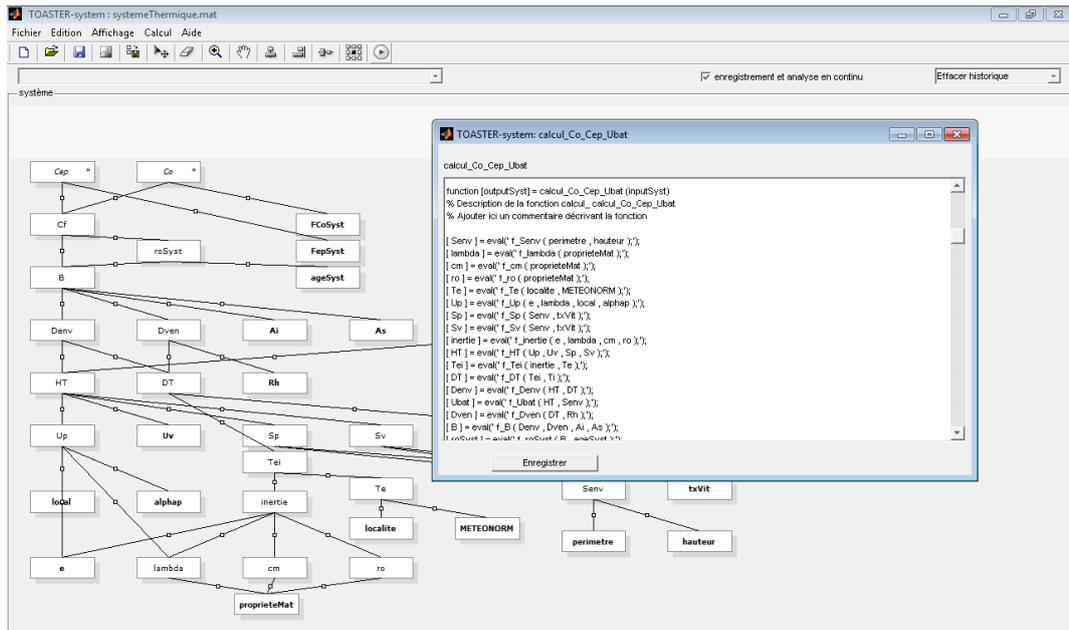
variables grâce à l'algorithme de Dijkstra) permet d'assurer que la compilation du modèle fonctionne avant même tout calcul numérique.

Cette méthode d'intégration modulaire a l'avantage de rendre transparente la construction du modèle pour tous les partenaires du projet (comme de la communauté scientifique destinataire de la recherche) et d'assurer l'homogénéité des hypothèses des divers entrants en jeu (variables exogènes) *sans impliquer la moindre simplification* dans la modélisation.



**Figure 55 : Architecture du module t-Heat construite sur t-Systems**

L'exemple, présenté dans la figure ci-dessus et représentant la partie « chauffage » du modèle *Toaster (toaster-Heat)*, permet de visualiser sous la forme d'un diagramme de Venn, la structure d'un calcul énergétique à l'échelle urbaine. Trois types de variables apparaissent ici : les variables endogènes articulées aux autres variables par des relations entrantes et sortantes, les variables exogènes, connectées aux autres variables par des relations uniquement sortantes et, enfin, les finalités du système liées à l'ensemble par des relations entrantes. Chaque relation est une fonction mathématique entre variables (par exemple, les fonctions *HT* ou *Cep* dans le schéma). L'intégration d'un sous-système, à l'image du sous-système « inertie », consiste à « endogénéiser » des variables exogènes : les finalités d'un sous-système conçu séparément remplaçant ainsi les variables exogènes d'un autre sous-système. A titre d'exemple, le sous-système *toaster-Heat* est, dans la figure, en attente d'une connexion avec les sous-systèmes *toaster-Uses* (comportement et usages) et *toaster-Solar* (rayonnement solaire). L'une de ses finalités (la variable *Cf* exprimant la consommation de chauffage instantanée en énergie finale) permet d'endogénéiser la consommation thermique et électrique en énergie finale dans le sous-système *toaster-Grid* (affectation des charges sur les réseaux). C'est la structure articulée de l'ensemble qui forme ici le modèle *Toaster*.

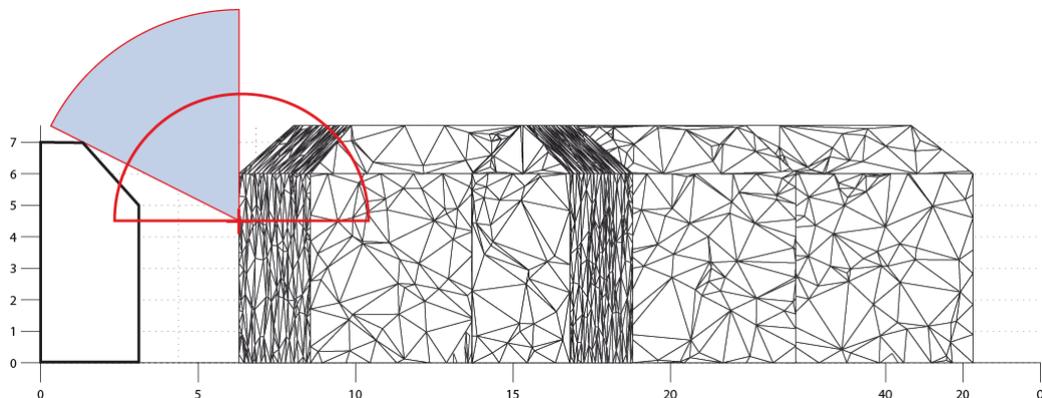


**Figure 56 : Plateforme de modélisation en système et d’implémentation, toaster-System**

La plateforme développée en langage Matlab®, *toaster-System*, permet de construire les briques du modèle et d’explicitier les relations mathématiques entre variables. La vérification de l’auto-cohérence du modèle se fait au fur et à mesure de sa conception (notamment, redondance, circularité et connexité) et garantit la transparence des hypothèses (fenêtre principale dans la figure). La compilation et l’établissement de l’algorithmique générale du modèle est assurée par une exploration heuristique du graphe (chemin et ordre) et produit une application de calcul des finalités du système (fenêtre de texte dans la figure).

**V.1.c. Module t-Solar**

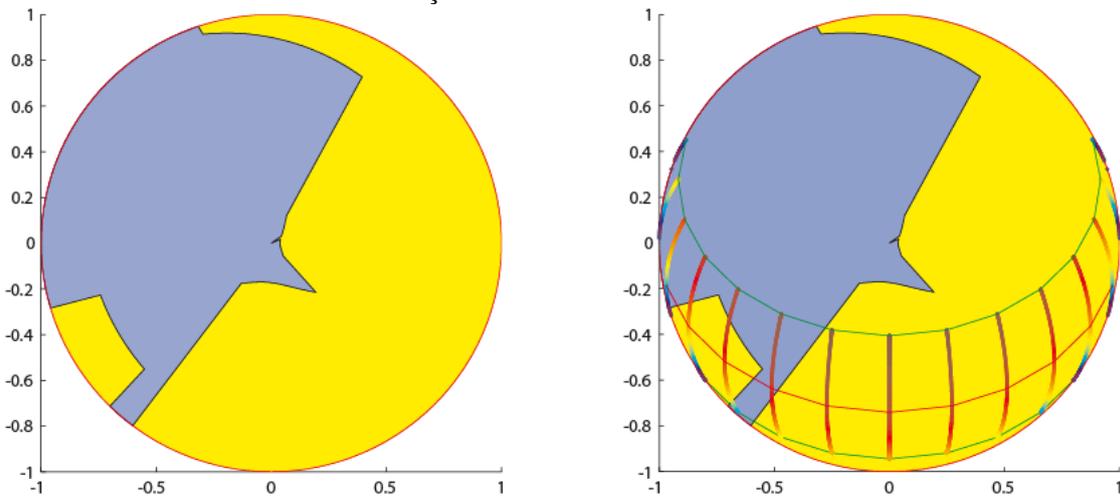
Fondé sur les outputs du module t-Geometry, le module t-Solar effectue un calcul géométrique des masques de l’environnement pour chaque centre du maillage. Ce calcul, relativement classique dans le domaine, consiste à déterminer la projection sphérique de l’environnement urbain à partir d’un foyer confondu avec le centre de gravité de chaque triangle du maillage.



**Figure 57 : Angle solide de ciel visible calculé pour chaque maille pour exemple d’îlot urbain**

Ce formalisme produit les coordonnées polaires de la voûte céleste visible (angle solide regardant le ciel) employées généralement pour représenter le diagramme

solaire au point de l'espace urbain considéré. L'ensemble des points de la course solaire calculée par le module et appartenant à la vue visible permet de déterminer avec un pas plus ou moins grand (par défaut horaire) le rayonnement solaire incident sur la façade.

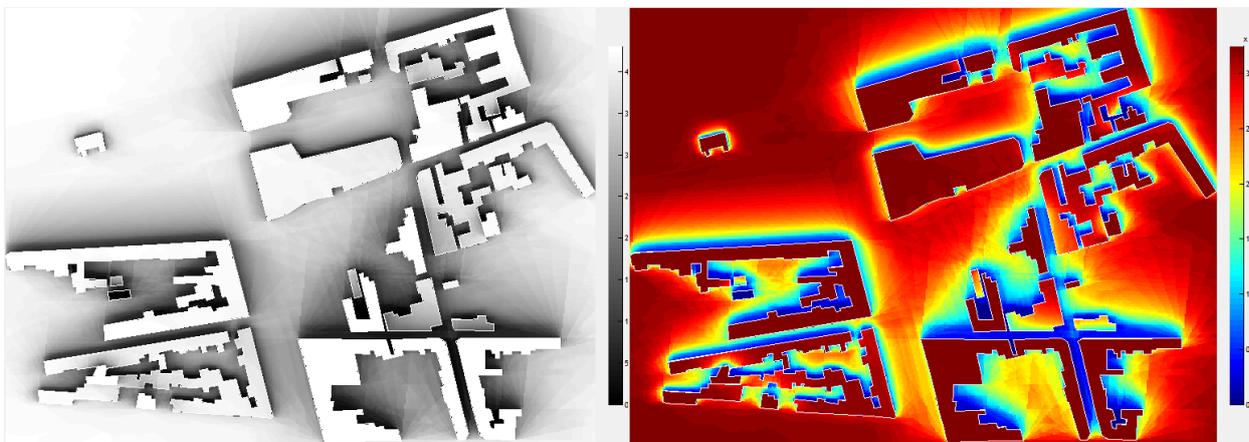


Détermination des masques de l'environnement urbain à partir du polygone de ciel visible

Incidence du rayonnement solaire à partir de l'analyse des relations entre points de la trajectoire solaire et polygone de ciel visible

**Figure 58 : Géométrie solaire du module t-Solar**

Cette procédure, relativement longue, surtout lorsqu'on l'applique à un espace urbain de grande taille, est réalisée sur un échantillon de triangles appartenant au maillage (la taille de cet échantillon variant en fonction de la résolution du maillage). Le rayonnement direct sur les triangles restants est enfin calculé grâce à une interpolation linéaire effectuée à partir des 3 points de l'échantillon les plus proches. Lorsque les informations climatiques sont disponibles à l'échelle locale, le rayonnement est calibré, grâce notamment à la nébulosité, pour produire le rayonnement solaire global (rayonnement direct augmenté du rayonnement diffus). Le module produit ainsi le rayonnement solaire instantané par  $m^2$  de surface d'enveloppe pour chaque bâtiment (en  $W/m^2$ ).



Durée d'ensoleillement cumulée

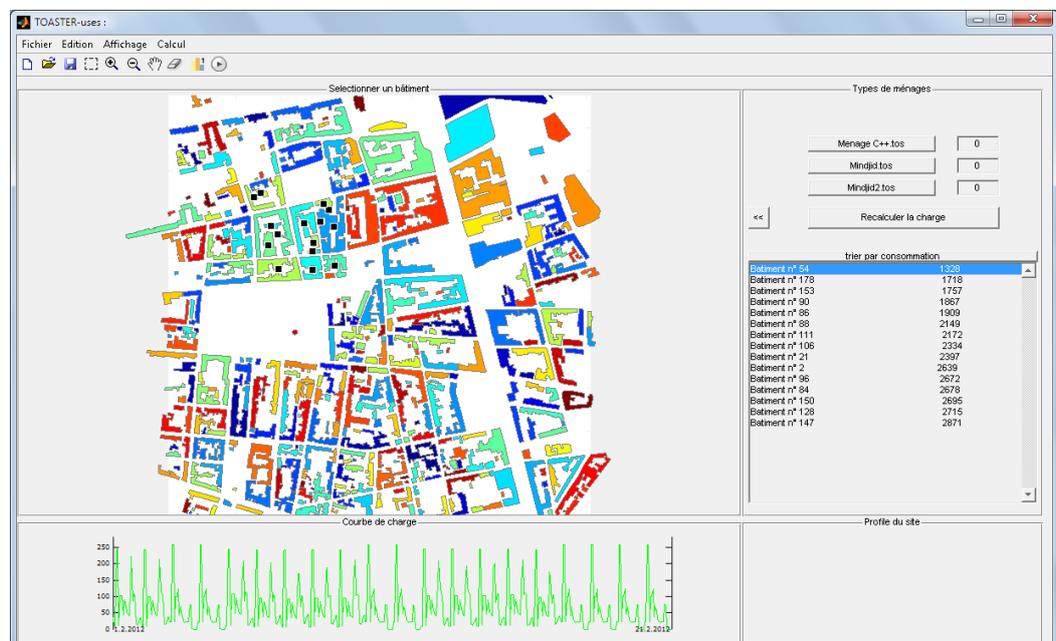
Rayonnement direct incident

**Figure 59 : Rayonnement sur l'espace urbain calculé par t-Solar**

#### V.1.d. Module t-Heat

Le module t-Heat est construit à partir d'un modèle classique de détermination des consommations énergétiques de chauffage et a été conçu grâce à t-Systems. Il est fondé sur une batterie d'hypothèses conventionnelles de transfert de chaleur et s'inspire, pour le calcul des effets inertiels de l'enveloppe, de la méthode simplifiée CAMIA. A l'instar des analyses énergétiques à l'échelle urbaine et territoriale qui considèrent généralement un rendement des systèmes de chauffage constant, le module endogénéise ce dernier avec les besoins de chauffage en reprenant les relations définies par la directive européenne 92/42/CEE (le rendement effectif variant en fonction du logarithme du besoin de chauffage instantané). Cette hypothèse supplémentaire permet de mettre en lumière les effets de dégradation des rendements, et donc de surconsommation d'énergie, induits par la variabilité et la dynamique des besoins de chauffage.

Selon cet ensemble d'hypothèses, reconstituer la courbe de charge des besoins thermiques et des consommations associées revient à fixer les inputs du calcul à l'échelle urbaine en se fondant sur une démarche typologique analogue à celle adoptée pour déterminer la géométrie des toitures. Chaque bâtiment appartient ainsi à un type architectural (défini par la période de construction) et est occupé par un type de ménage selon une probabilité fixée par les données du RGP à l'échelle de chaque IRIS. Couplé aux outputs de t-Solar (apports solaires) et t-Uses (apports internes), t-Heat établit une courbe de charge des consommations de chauffage au pas horaire. Signalons ici que cette courbe, même si elle dépasse largement celui des bilans généralement effectués à l'échelle territoriale, ne relève pas du niveau de précision résultant d'une simulation effectuée par des logiciels commerciaux de type Comfie-Pleiade, TRNSYS ou ECOTEC.



**Figure 60 : Interface du module t-Heat**

#### **V.1.e. Module t-Uses**

t-Uses est un module qui permet de reconstituer la courbe de charge (au moyen de CHARTER®) des consommations électriques induit par les « comportements » des usagers des espaces considérés (les logements).

Les comportements en interaction avec le système énergétique sont définis et déterminés à partir de la notion de programme des pratiques du logement. Ce programme des pratiques domestiques revient à postuler que les comportements se matérialisent dans le déroulement de l'emploi du temps des personnes résidant dans un même logement. Un tel emploi du temps décrit les diverses activités ou tâches domestiques qui impliquent une consommation d'énergie et que réalisent les membres d'un même ménage le long d'une journée. Cette notion est ainsi la traduction de ce que l'on entend par les usages spécifiques de l'énergie dans le logement (en l'enrichissant d'une dimension systémique). Il s'agit alors de bâtir les diagrammes de Gantt des activités ordinaires de telle manière à édifier une typologie de systèmes d'usages par type de ménage.

Dans la recherche Toaster, les déterminants de ces diverses pratiques sont d'ordre ethnologique avec une typologie des systèmes d'usages de l'énergie reposant sur les descripteurs quantitatifs : les ménages sont typifiés sur la base de déterminants réputés pertinents du point de vue des systèmes d'usages électriques, notamment ceux relatifs au nombre et à l'âge des membres d'un même logement. Une telle définition des déterminants a l'avantage, d'une part, de correspondre aux données statistiques de l'INSEE disponibles pour l'année 2008 (pour la France) en ce qui concerne le niveau d'équipement électrique des logements ; d'autre part, de coïncider aux théories explicatives du comportement des ménages appliquées aux usages spécifiques dans le logement. On estime, ici, que la variabilité des comportements peut être modélisée par l'introduction de mouvements aléatoires des activités dans les diagrammes de Gantt.

## V.2. Le modèle Charter®

---

### V.2.a. Liste des usages reconstitués

CHARTER® permet de reconstituer les consommations électriques horaires des usages suivants :

Type d'usage	Usage
Produits blancs	Sèche-Linge
	Lave-Vaisselle
	Lave-Linge
Froid	Combiné
	Réfrigérateur
	Congélateur
Cuisson concurrentielle	Cuisinière
	Four
	Tables de cuisson
Produits bruns	Chaîne HIFI
	Téléviseur
	Décodeur
	Console de Jeux
	Lecteur DVD
Produits gris	Box
	Ordinateur fixe
	Ordinateur portable
	Imprimante
Cuisson spécifique	Modem
	Micro-Onde
	Cafetière
	Bouilloire
	Friteuse
	Grille-Pain
	Hotte
Nettoyage	Minifour
	Aspirateur
	Fer à repasser
Autres	Centrale vapeur
	Eclairage
	Auxiliaires
	Ventilation
	Refroidissement
Piscines Individuelles	

**Tableau 18 : Liste des usages modélisés au sein de l'outil CHARTER®**

### V.2.b. Paramètres clés du calcul

La consommation électrique de chacun des usages est déterminée dans le modèle CHARTER® à partir de trois paramètres clés :

- **Le taux d'équipement** de l'appareil : part de la population probablement équipée pour l'usage considéré
- **Le temps d'utilisation annuel** de l'équipement pour cet usage (et le pourcentage de veille effective de ce même équipement)
- **La puissance** moyenne (en fonctionnement et en veille) de l'appareil

Le produit de ces trois paramètres permet d'obtenir la consommation recherchée. Dans un premier temps, pour chacun des usages, une valeur moyenne de ces paramètres est déterminée en utilisant la méthode suivante :

- Etude de l'équipement devant permettre d'obtenir, au travers d'une reconstitution de la dynamique d'évolution du parc, un taux d'équipement moyen et une puissance moyenne en fonctionnement et en veille.
- Etude des comportements de consommation des usagers aboutissant à un temps de fonctionnement annuel moyen de l'équipement étudié

Une fois ces valeurs moyennes obtenues, un lourd travail bibliographique a été mené afin de différencier les consommations en fonction de certains critères. En effet, les usagers ne consomment pas de la même manière selon leur âge, leur catégorie socioprofessionnelle, leur type de logements... Ce travail a permis de différencier les trois paramètres clés en fonction de critères judicieusement choisis.

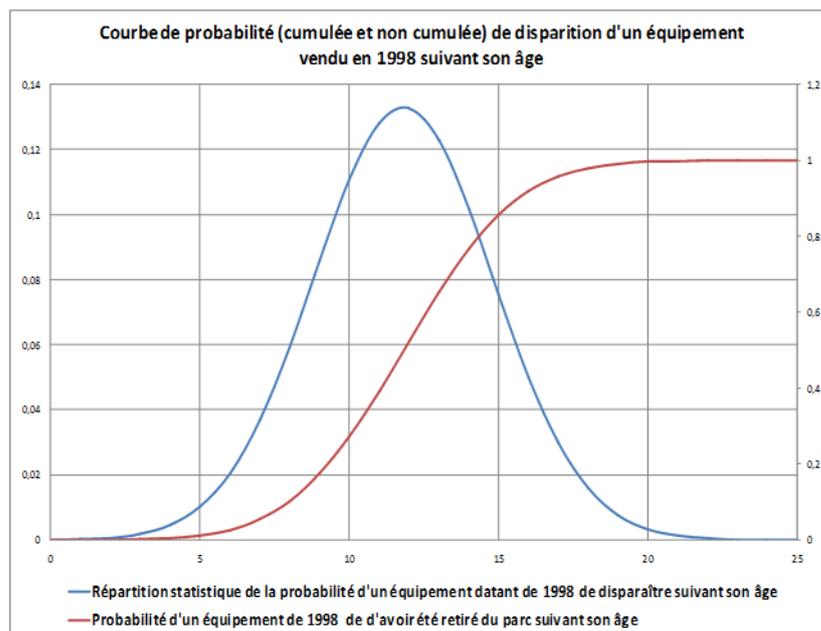
### V.2.c. Parc d'équipements et puissance moyenne

Afin de mettre en place cette phase plusieurs types de données, pour chaque équipement, ont été recherchés dans la littérature :

- Historique des ventes par technologie (ou étiquette énergie pour les produits concernés)
- Durée de vie par type d'appareils
- Puissance moyenne des appareils par technologie (ou étiquette énergie pour les produits concernés)

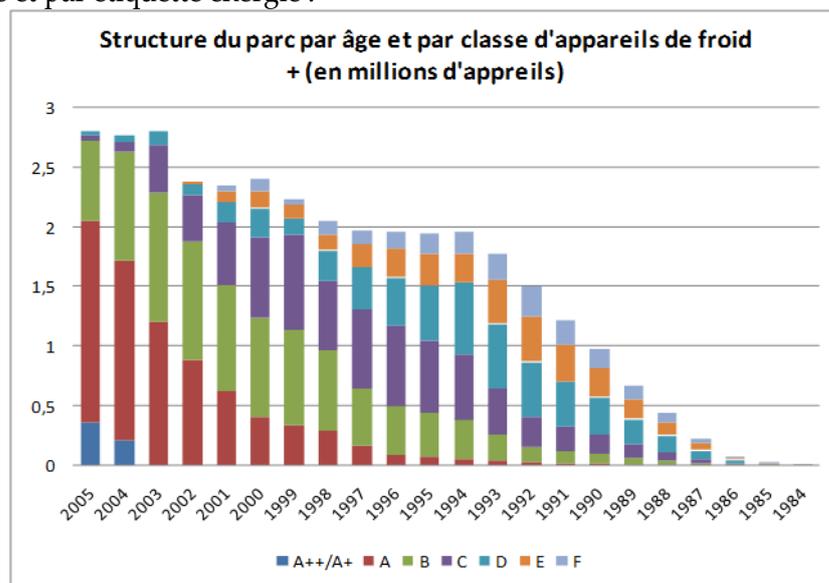
Cette remontée d'informations a permis dans un premier temps de calculer une durée de vie et une puissance des appareils par année de vente.

Ensuite, à chaque appareil vendu dans les années recensées a été affecté une courbe de survie de type loi normale, centrée sur la durée de vie de l'appareil et d'écart-type fluctuant entre 10 et 40% de la durée de vie en fonction de la sensibilité de l'usage au renouvellement technologique (plus l'écart type est petit plus la sensibilité au renouvellement technologique est faible). Voici une représentation graphique de la courbe de probabilité de disparition d'un équipement de 98 :



**Figure 61 : Courbe de probabilité de disparition d'un équipement**

Cette étape nous permet ainsi de pouvoir reconstituer un parc d'équipement par année et par technologie (ou par étiquette énergie pour les appareils concernés). Voici par exemple la reconstitution du parc 2008 de réfrigérateurs et de combinés par âge et par étiquette énergie :



**Figure 62 : Structure du parc d'appareils de froid**

Afin de s'assurer de la véracité des résultats obtenus à ce stade de la méthode, une comparaison est réalisée entre la taille des parcs obtenus dans les phases 1 (parc résidentiel) et 2 (parc national). Dans la plupart des cas, sans ajustement nécessaire, les deux chiffres concordent : soit les résultats sont identiques, soit le parc d'équipements résidentiels est légèrement inférieur au parc total (dans le cas des appareils également présents chez les professionnels comme les réfrigérateurs). La structure par âge du parc obtenue précédemment nous permet de pouvoir calculer une puissance moyenne par équipement du parc. En croisant ensuite cette information avec un temps de fonctionnement annuel moyen (données provenant

généralement de sources différentes d'Énergies Demain : INSEE, Enertech, ...) on obtient une estimation de la consommation unitaire moyenne par équipement et de la consommation annuelle moyenne par logement en 2008.

#### **V.2.d. Différenciation des usages**

Il s'agit maintenant de différencier les taux d'équipement, temps d'utilisation et puissance de chacun des usages étudiés en fonction de différentes structures des ménages. Les critères faisant varier les consommations sont différents d'un usage à l'autre et dépendent principalement des informations disponibles sur les usages. Il est par exemple beaucoup plus facile d'obtenir des campagnes de mesures ou des enquêtes sur les consommations des lave-linges que des informations sur la consommation des friteuses. Ainsi la consommation des lave-linges va varier en fonction du type de ménage, du nombre de personnes dans le ménage, de l'âge de la personne de référence du ménage et de sa CSP, tandis que la consommation des friteuses est la même pour tous.

Le tableau ci-dessous précise les critères de différenciation pour les divers usages, la consommation de l'usage « Réfrigérateur » par exemple va dépendre du nombre de personne du ménage, de la catégorie socio professionnelle de la personne de référence du ménage et de la région où vit le ménage.

Usages		TYP MC	N PER	AGE	CSP	REG	TUU	SURF	TYBAT
Produits blancs	Sèche-Linge	X	X	X	X	X			
	Lave-Vaisselle	X	X	X	X				
	Lave-Linge	X	X	X	X				
Froid	Combiné		X		X	X			
	Réfrigérateur		X		X	X			
	Congélateur	X	X	X	X	X	X		
Cuisson concurrent	Cuisinière		X	X	X	X			
	Four		X	X	X	X			
	Tables de cuisson		X	X	X	X			
Produits bruns	Chaîne HIFI		X	X	X				
	Téléviseur	X	X	X	X				
	Décodeur		X				X		
	Console de Jeux								
	Lecteur DVD								
Produits gris	Box	X	X						
	Ordinateur fixe	X	X	X	X				
	Ordinateur portable	X	X	X	X				
	Imprimante								
	Modem								
Cuisson spécifique	Micro-Onde	X		X	X				
	Cafetière				X				
	Bouilloire								
	Friteuse								
	Grille-Pain								
	Hotte								
	Minifour								
Nettoyage	Aspirateur	X		X	X				
	Fer repasser								
	Centrale vapeur								
Autres	Eclairage					X		X	X
	Auxiliaires								
	Ventilation								
	Refroidissement								
	Piscines Individuelles				X	X			

**Tableau 19 : Liste des critères de différenciation utilisés pour les déterminants de consommations de chaque usage modélisé au sein de CHARTER®**

Ce travail permet de faire varier les paramètres clés de chaque usage, et par conséquent leur consommation, selon les typologies de ménage.

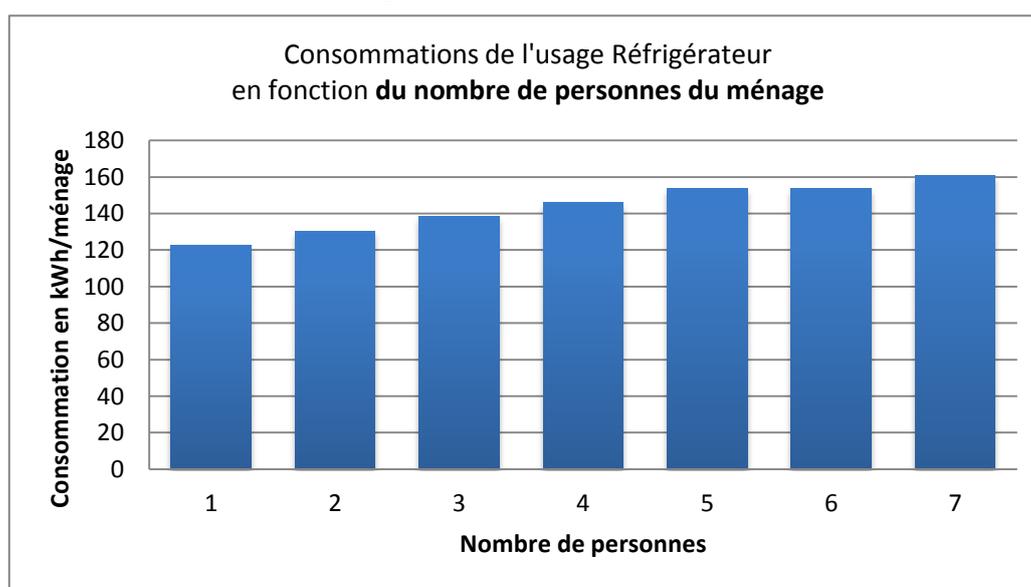
Par exemple, voici un extrait de la table d'entrée pour l'usage Réfrigérateur :

Nombre de personnes	Région	CSP Référent	Taux d'équipement	Temps d'utilisation (h/an)	PUISSANCE (W)	Consommation (kWh/an)
1	Corse	Agriculteur	59%	8760	25	129
2	Bretagne	Retraité	57%	8760	25	126
3	Aquitaine	Agriculteur	59%	8760	28	142
4	Haute Normandie	Commerçant	57%	8760	28	141
4	Bretagne	Inactif	57%	8760	28	140
6	Alsace	Ouvrier	58%	8760	30	153
7	Nord	Agriculteur	59%	8760	31	161

**Tableau 20 : Extrait de table d'entrée de l'outil CHARTER® pour l'usage réfrigérateur**

Dans ce cas précis, le temps d'utilisation des réfrigérateurs ne varie pas, on considère que l'appareil fonctionne sans interruption toute l'année. En revanche, le taux d'équipement et la puissance vont par contre dépendre des paramètres indiqués. Nos hypothèses supposent, par exemple, qu'un ménage de 7 personnes dont la personne de référence est agriculteur et vivant dans le Nord va posséder un appareil de plus grande puissance qu'un couple de retraités vivant en Bretagne.

Les variations données par les tables d'entrée sont les suivantes :

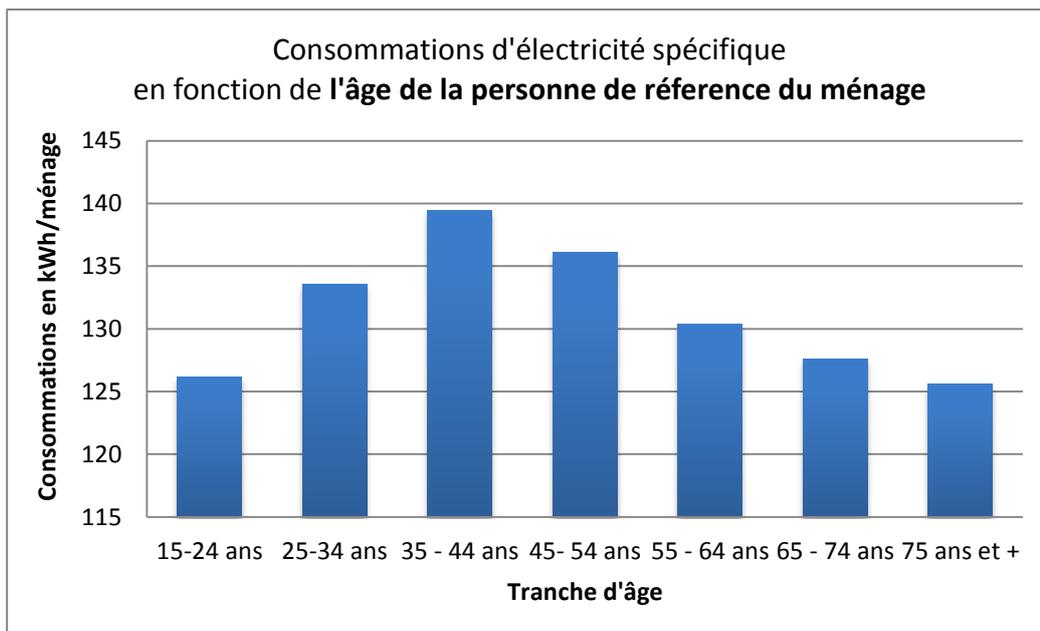


**Figure 63 : Consommations électriques liées à l'usage « Réfrigérateur » d'un ménage en fonction de son nombre de personnes**

Pour cet usage, les sources utilisées sont les études d'équipement des ménages menées par l'INSEE.

En recoupant enfin avec la description des ménages français donnée à la commune, on obtient une base associant à chaque typologie de ménage, une consommation électrique pour chacun des usages cités.

Pour l'usage Réfrigérateur par exemple, on peut connaître la variation de consommation selon une série de critères supplémentaires :



**Figure 64 : Consommations électriques liées à l'usage « Réfrigérateur » d'un ménage en fonction de la tranche d'âge du référent**

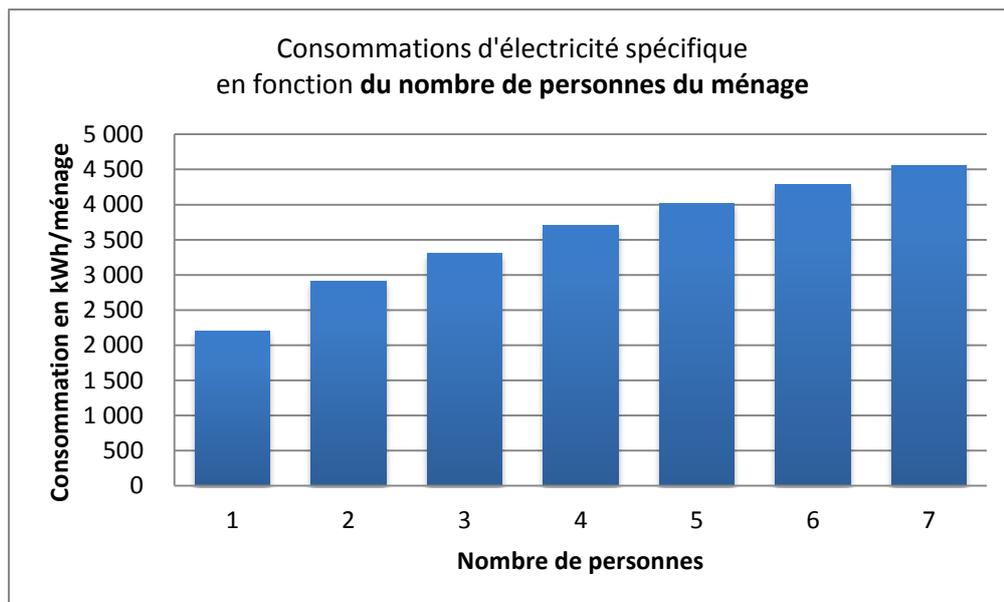
On retrouve dans ces résultats les corrélations qui existent entre les caractéristiques des ménages : les ménages dont la personne de référence a entre 35 et 45 ans sont ceux avec le plus de personnes. En effet ils ont plus de chances d'être composés d'un couple avec enfants.

#### **V.2.e. Résultats obtenus**

D'après CHARTER®, la consommation moyenne d'électricité spécifique des ménages français est de **2 906 kWh** par an.

Les résultats ci-dessous présentent les variations de la consommation électrique spécifique annuelle moyenne des ménages en fonction des principaux critères de caractérisation des ménages. C'est-à-dire de la somme des consommations des usages pris en compte dans l'outil.

Le critère le plus déterminant dans les variations de ces consommations est le nombre de personnes du ménage. Comme le montre le graphe ci-dessous, les consommations peuvent varier du simple au double selon qu'il s'agit d'une personne vivant seule ou d'une famille. On aurait pu s'attendre à une différence plus importante entre un foyer d'une ou de sept personnes, mais beaucoup d'usages de grande consommation ne varient que peu en fonction du nombre de personnes : les usages de froid notamment, dont la puissance varie légèrement mais pour lesquels le temps d'utilisation et le taux d'équipement est quasiment le même pour tout le monde.



**Figure 65 : Consommations totales d'électricité spécifique d'un ménage en fonction de son nombre de personnes**

### V.3. Le modèle d'optimisation

---

#### V.3.a. Principes du module d'optimisation

Afin de définir le meilleur plan de modulation de la demande sur un territoire, il est nécessaire de définir précisément les impacts qu'aurait un plan de modulation sur la demande de ce dernier. Ayant précédemment défini les consommations des territoires par usage, il nous faut maintenant étudier l'impact par usage des différentes possibilités de modulation. Considérons la fonction C de consommation avant modulation du territoire telle que pour chaque heure t de l'année :

$$C(t) = \sum_{k=1}^m \sum_{i=1}^o C_{i,k}(t)$$

Avec les notations suivantes :

C(t) : Consommation de l'agrégat de bâtiments au temps t

o, m : Nombre d'usages/profils d'usagers recensés respectivement

$C_{i,k}(t)$  : Consommation de l'usage i pour le profil k de l'agrégat de bâtiments au temps t

Des vecteurs d'impact d'effacement sont définis de la manière suivante : si un ordre d'effacement est envoyé à l'heure h, l'usage effacé peut être rattrapé dans les heures suivantes. Cela permet de définir les vecteurs au format suivant (exemple de rattrapage de la consommation à h+5) :

$$v_{eff} = [0; 0; 0; 0; 0; 1; 0; 0]$$

Le premier 0 correspond à l'ordre d'effacement envoyé à l'heure h, le 1 en h+5 correspond au rattrapage de la consommation en h+5.

Le but de la routine d'optimisation est de minimiser l'écart entre la courbe de consommation après effacement et la fonction objective, c'est-à-dire la distance entre la courbe de consommation et la courbe objectif.

Mathématiquement, cela peut être écrit de la manière suivante :

$$\min_{x \in D} \sum_t [C(t, x) - O(t)]^2$$

Avec les notations suivantes :

x : plan d'effacement (pour chaque usage i et profil k, x donne la part des consommations à effacer toutes les heures)

D : ensemble des plans d'effacement respectant toutes les contraintes voulues (par exemple, il est possible de définir des plages horaires pendant lesquelles certains usages ne peuvent pas être effacés etc...)

C(t,x) : Consommation totale de l'agrégat de bâtiments au temps t après prise en compte du plan d'effacement x

O(t) : Fonction objectif à atteindre

Ainsi la fonction à minimiser est la somme des écarts au carré (pour entre la courbe de consommation après effacement et la fonction objective

La fonction à minimiser est convexe, ce qui permet l'utilisation de multiple techniques mathématiques d'optimisation.

L'algorithme FISTA (Fast Iterative Shrinkage Thresholding Algorithm) a été choisi pour sa robustesse et sa convergence rapide (Amir Beck and Marc Teboulle (2009), une description plus précise du modèle mathématique peut être consultée ici : <http://mechroom.technion.ac.il/~becka/papers/71654.pdf>).

La routine d'optimisation consiste donc à proposer au programme plusieurs possibilités d'effacement (rattrapage en h+1, h+2, etc... voir anticipation en h-1) pour tous les usages « effaçables » des profils sélectionnés.

Le résultat renvoyé est un planning des ordres d'effacement à envoyer pour chacun des usages « effaçables » des profils sélectionnés. La routine sera lancée sur plusieurs agrégats de bâtiments afin de définir la maille minimale à laquelle le foisonnement des moyens de productions renouvelables (photovoltaïque, éolienne) et les ordres d'effacement permettent de limiter les consommations d'électricité d'origine centralisée.

#### **V.4. La méthode de simulation des besoins thermiques à l'échelle du bâtiment**

---

Les besoins en chauffage ont été évalués sur plusieurs types de logements aux caractéristiques suivantes :

- Type de logement – Maison individuelle isolée de plain-pied ou immeuble R+3 mitoyen (contigu à d'autres immeubles de même dimension sur les 2 côtés sans fenêtre) de géométrie rectangulaire standard (dimensions à définir par le coordinateur du projet « TOASTER »).
- Type d'enveloppe – avant 1950, 1975, BBC.
- Vitrage – simple vitrage avec un taux de 20 et 40% respectivement pour les constructions avant 1950 et 1975, uniquement sur les façades avant (côté rue) et arrière. Pour les logements BBC, cette valeur sera ajustée pour satisfaire les critères de consommations.
- Environnement – pas d'environnement immédiat ou vis-à-vis constitué d'un immeuble R+3 à une distance de 9 m côtés avant et arrière.
- Orientation – 12 orientations par pas de 15°.
- Combles – 2 cas seront étudiés : avec ou sans combles.
- Composition du foyer – 2 cas (par exemple : célibataire et famille avec enfants).

La pente de la toiture sera de 30° et tous les types de bâtiments seront modélisés avec une seule zone thermique et des apports internes standards seront considérés.

Un scénario de consignes de température (incluant notamment le niveau de consigne standard et le niveau consigne d'effacement) sera communiqué par le coordinateur du projet en fonction de la composition du foyer.

L'objectif de l'étude numérique est de simuler les cas identifiés sur une année complète et de communiquer au coordinateur du projet les résultats de simulation sous forme de fichier texte (ou équivalent) contenant les besoins de chauffage, heure par heure, ainsi que les niveaux de température. Cette étude se décomposera en trois phases.

Dans une première phase, une simulation sans stratégie d'effacement sera mise en œuvre.

Dans une deuxième phase, un effacement d'une heure sera pris en compte au moment de la pointe nationale de consommation (vers 19h).

Dans une troisième phase, un scénario d'une année d'effacements aléatoires sera simulé. Il sera constitué d'une série de 365 effacements dont les moments (date et heure) de début et de fin seront déterminés aléatoirement, avec d'éventuelles contraintes de fréquence et de durée. Afin de tester la sensibilité des bâtiments à cet aléa, plusieurs scénarios aléatoires seront générés et simulés. ARMINES cherchera à développer une stratégie d'automatisation de ces calculs. En cas de succès, le nombre de scénarios aléatoires pourra aller jusqu'à 1000. En cas de nécessité, le nombre potentiellement élevé de simulations pourra être réduit en accord avec le coordinateur du projet, notamment en restreignant le nombre de cas simulés (des cas caractéristiques pourront être sélectionnés en se basant sur les deux premières phases de l'étude).

Pour effectuer l'ensemble de ces simulations, l'outil COMFIE sera utilisé car il répond à des critères de convivialité (saisie graphique et interface), de rapidité de calcul (réduction de modèle) et de précision (plusieurs études de validation).

Le but est d'avoir une première idée des besoins de chauffage et du pourcentage d'inconfort estival en faisant varier certains paramètres comme l'enveloppe du bâtiment, l'année de construction, la typologie du bâtiment (RDC et R+3). Ici les cas de la maison individuelle et de l'immeuble collectif sont traités.

#### V.4.a. Scénarios étudiés

Bâtiment ancien Pierre 1950	Bâtiment Béton 1974	Bâtiment BBC
Ventilation naturelle (infiltrations).	Ventilation mécanique (simple flux) + infiltrations.	Ventilation mécanique (double flux) + infiltration
Production de chaleur par radiateurs électriques	Production de chaleur par radiateurs électriques	Production de chaleur par radiateurs électriques

**Tableau 21 : Trois périodes de construction étudiées : 1950, 1974 et BBC**

#### V.4.b. Généralités

<b>Localisation :</b>	48° 46' 12"N 2° 0' 0" E		Trappes
<b>Altitude :</b>	168 m		
<b>Température extérieure de base</b>	-7°C		
<b>Surface au sol</b>	70 m <sup>2</sup>		
<b>Volume à chauffer estimé :</b>	175 m <sup>3</sup>		
<b>Nombre de niveaux :</b>	RDC + combles perdus (maison)		R+3 (immeuble)
<b>Type de construction :</b>	Bâtiment ancien 1950 Murs pierre 40 cm Plancher sur terre-plein en bois Rampant non isolé (maison) Toiture terrasse (immeuble)	Bâtiment 1974 Murs béton lourd faiblement isolé Plancher sur terre-plein béton Rampant non isolé Toiture terrasse (immeuble)	Bâtiment BBC Murs extérieurs béton isolé Plancher sur terre-plein béton Rampant non isolé Toiture terrasse (immeuble)
<b>Hauteur sous plafond (m)</b>	2.50		
<b>Hauteur combles (m)</b>	2.0		
<b>Utilisation du bâtiment :</b>	Habitation maison individuelle pour 4 personnes		Habitat collectif et commerce
<b>Orientation :</b>	Pignons orienté Est-Ouest		
<b>Masques solaires :</b>	Pas de masques, terrain nue.		
<b>Ponts thermiques</b>	1950	1974	BBC
	négligés	Non négligés	Non négligés
<b>Albédos</b>	Gazon		
<b>Masques lointains</b>	Aucun		
<b>Masques proches</b>	Aucun		
<b>Masques intégrés</b>	Débord de 20 cm à gauche, à droite et en bas.		

**Tableau 22 : Généralités et hypothèses de l'étude**

#### V.4.c. Composition de l'enveloppe

Nous avons travaillé sur la base de données météorologique de la station de Trappes.

#### Unités

Caractéristique	Libellé	Unité
Epaisseur	Ep	cm
Conductivité	$\lambda$	W/(m.K)
Masse volumique	MV	kg/m <sup>3</sup>
Chaleur spécifique	CS	Wh/(kg.K)
Coefficient de transmission surfacique	U	W/(m <sup>2</sup> .K)
Résistance thermique	R	(m <sup>2</sup> .K)/W

**Tableau 23 : Libellés et unités des grandeurs utilisées dans Pléiades-Comfie**

#### V.4.d. Liste des compositions utilisées en Maison Individuelle (MI)

##### 1950

Composition Simple	combles perdus 1950 MI					
Composante	Ep	$\lambda$	MV	CS	U	R
Enduit plâtre	2.0	0.350	1500	0.278	17.50	0.06
Lame d'air 100 mm flux horiz.	10.0	0.556	1	0.340	5.56	0.18
Enduit plâtre	2.0	0.350	1500	0.278	17.50	0.06
Total					3.40	0.29

**Tableau 24 : Composition du plancher haut 1950 (combles perdus)**

Composition Simple	rampant 1950 MI					
Composante	Ep	$\lambda$	MV	CS	U	R
Terre cuite	1.0	1.150	1900	0.250	115.00	0.01
Lame d'air > 1.3 cm	1.5	0.090	1	0.340	6.25	0.16
Enduit plâtre	2.0	0.350	1500	0.278	17.50	0.06
Total					4.43	0.23

**Tableau 25 : Composition des rampants 1950**

Composition Simple	plancher sur terre plein 1950 MI					
Composante	Ep	$\lambda$	MV	CS	U	R
Bois léger	2.5	0.150	500	0.333	6.00	0.17
Mortier	5.0	1.150	2000	0.233	23.00	0.04
Carrelage	1.0	1.700	2300	0.194	170.00	0.01
Total					4.63	0.22

**Tableau 26 : Composition du plancher sur terre-plein 1950**

Composition Simple	Mur ext Pierre 40 cm MI					
Composante	Ep	$\lambda$	MV	CS	U	R
Enduit extérieur	2.0	1.150	1700	0.278	57.50	0.02
Calcaire ferme	40.0	1.700	2200	0.222	4.25	0.24
Enduit plâtre	2.0	0.350	1500	0.278	17.50	0.06
<b>Total</b>					3.23	0.31

**Tableau 27 : Composition des murs extérieurs 1950**

1974

Composition Simple	rampant non isole 1974 MI					
Composante	Ep	$\lambda$	MV	CS	U	R
Terre cuite	1.0	1.150	1900	0.250	115.00	0.01
Lame d'air > 1.3 cm	1.5	0.090	1	0.340	6.25	0.16
Placoplatre BA 13	1.3	0.320	850	0.222	25.00	0.04
<b>Total</b>					4.79	0.21

**Tableau 28 : Composition des rampants 1974**

Composition Simple	combles perdus 1974 MI					
Composante	Ep	$\lambda$	MV	CS	U	R
Laine de verre	8.0	0.041	12	0.233	0.51	1.95
Béton lourd	20.0	1.750	2300	0.256	8.75	0.11
Placoplatre BA 13	1.3	0.320	850	0.222	25.00	0.04
<b>Total</b>					0.47	2.11

**Tableau 29 : Composition du plancher haut 1974 (combles perdus)**

Composition Simple	plancher sur terre plein 1974 MI					
Composante	Ep	$\lambda$	MV	CS	U	R
Béton lourd	20.0	1.750	2300	0.256	8.75	0.11
Polystyrène expansé	4.0	0.039	25	0.383	0.97	1.03
Mortier	5.0	1.150	2000	0.233	23.00	0.04
Carrelage	1.0	1.700	2300	0.194	170.00	0.01
<b>Total</b>					0.84	1.19

**Tableau 30 : Composition du plancher sur terre-plein 1974**

Composition Simple	Murs ext 1974 MI					
Composante	Ep	$\lambda$	MV	CS	U	R
Béton lourd	20.0	1.750	2300	0.256	8.75	0.11
Laine de verre	5.0	0.041	12	0.233	0.82	1.22
<b>Total</b>					0.75	1.33

**Tableau 31 : Composition des murs extérieurs 1974**

BBC

Composition Simple	combles perdus BBC MI					
Composante	Ep	$\lambda$	MV	CS	U	R
Laine de verre	20.0	0.041	12	0.233	0.20	4.88
Béton lourd	20.0	1.750	2300	0.256	8.75	0.11
Placoplatre BA 13	1.3	0.320	850	0.222	25.00	0.04
Total					0.20	5.03

**Tableau 32 : Composition du plancher haut BBC (combles perdus)**

Composition Simple	rampant non isole BBC MI					
Composante	Ep	$\lambda$	MV	CS	U	R
Terre cuite	1.0	1.150	1900	0.250	115.00	0.01
Lame d'air > 1.3 cm	1.5	0.090	1	0.340	6.25	0.16
Placoplatre BA 13	1.3	0.320	850	0.222	25.00	0.04
Total					4.79	0.21

**Tableau 33 : Composition des rampants BBC**

Composition Simple	plancher bas sur terre plein BBC MI					
Composante	Ep	$\lambda$	MV	CS	U	R
Laine de verre	20.0	0.041	12	0.233	0.20	4.88
Béton lourd	20.0	1.750	2300	0.256	8.75	0.11
Mortier	5.0	1.150	2000	0.233	23.00	0.04
Carrelage	1.0	1.700	2300	0.194	170.00	0.01
Total					0.20	5.04

**Tableau 34 : Composition du plancher bas sur terre-plein BBC**

Composition Simple	Murs ext BBC MI					
Composante	Ep	$\lambda$	MV	CS	U	R
Béton lourd	20.0	1.750	2300	0.256	8.75	0.11
Laine de verre	20.0	0.041	12	0.233	0.20	4.88
Placoplatre BA 13	1.3	0.320	850	0.222	25.00	0.04
Total					0.20	5.03

**Tableau 35 : Composition des murs extérieurs BBC**

V.4.e. Liste des compositions utilisées en Immeuble collectif (IC)

*1950*

Composition Simple	toiture terrasse 1950 IC					
Composante	Ep	$\lambda$	MV	CS	U	R
Sable et gravier	5.0	2.000	1950	0.253	40.00	0.03
Pl. bois sans rempl. sce	17.5	0.360	650	0.444	2.05	0.49
Enduit plâtre	2.0	0.350	1500	0.278	17.50	0.06
<b>Total</b>					1.76	0.57

**Tableau 36 : Composition de la toiture-terrasse 1950**

Composition Simple	plancher bas sur vide sanitaire 1950 IC					
Composante	Ep	$\lambda$	MV	CS	U	R
Pl. bas solives bois avec augets plâtre et plâtras	17.5	0.246	1150	0.278	1.40	0.71
Mortier	5.0	1.150	2000	0.233	23.00	0.04
Carrelage	1.0	1.700	2300	0.194	170.00	0.01
<b>Total</b>					1.31	0.76

**Tableau 37 : Composition du plancher bas sur vide sanitaire 1950**

Composition Simple	plancher intermediaire 1950 IC					
Composante	Ep	$\lambda$	MV	CS	U	R
Enduit plâtre	1.0	0.350	1500	0.278	35.00	0.03
Lame d'air 100 mm flux horiz.	10.0	0.556	1	0.340	5.56	0.18
Pl. bois sans rempl. sr	7.5	0.176	650	0.444	2.35	0.43
<b>Total</b>					1.58	0.63

**Tableau 38 : Composition du plancher intermédiaire 1950**

Composition Simple	Mur ext Pierre 40 cm1950 IC					
Composante	Ep	$\lambda$	MV	CS	U	R
Bois léger	1.0	0.350	1500	0.278	35.00	0.03
Lame d'air 100 mm flux horiz.	10.0	0.556	1	0.340	5.56	0.18
Enduit plâtre	7.5	0.176	650	0.444	2.35	0.43
<b>Total</b>					1.58	0.63

**Tableau 39 : Composition des murs extérieurs 1950**

1974

Composition Simple	plancher intermédiaire 1974 IC					
Composante	Ep	$\lambda$	MV	CS	U	R
Béton lourd	20.0	1.750	2300	0.256	8.75	0.11
Mortier	5.0	1.150	2000	0.233	23.00	0.04
Carrelage	1.0	1.700	2300	0.194	170.00	0.01
Total					6.11	0.16

**Tableau 40 : Composition du plancher intermédiaire 1974**

Composition Simple	toiture terrasse 1974 IC					
Composante	Ep	$\lambda$	MV	CS	U	R
Sable et gravier	5.0	2.000	1950	0.253	40.00	0.03
Laine de verre	8.0	0.041	12	0.233	0.51	1.95
Lame d'air > 1.3 cm	1.5	0.090	1	0.340	6.25	0.16
Hourdis de 20 en béton	20.0	1.330	1300	0.180	6.67	0.15
Enduit plâtre	2.0	0.350	1500	0.278	17.50	0.06
Total					0.43	2.34

**Tableau 41 : Composition de la toiture-terrasse 1974**

Composition Simple	plancher bas sur vide sanitaire 1974 IC					
Composante	Ep	$\lambda$	MV	CS	U	R
Béton lourd	20.0	1.750	2300	0.256	8.75	0.11
Polystyrène expansé	4.0	0.039	25	0.383	0.97	1.03
Mortier	5.0	1.150	2000	0.233	23.00	0.04
Carrelage	1.0	1.700	2300	0.194	170.00	0.01
Total					0.84	1.19

**Tableau 42 : Composition du plancher bas sur vide sanitaire 1974**

Composition Simple	Murs ext 1974 IC					
Composante	Ep	$\lambda$	MV	CS	U	R
Béton lourd	20.0	1.750	2300	0.256	8.75	0.11
Laine de verre	5.0	0.041	12	0.233	0.82	1.22
Total					0.75	1.33

**Tableau 43 : Composition des murs extérieurs 1974**

BBC

Composition Simple	Toiture terrasse BBC IC					
Composante	Ep	$\lambda$	MV	CS	U	R
Sable et gravier	10.0	2.000	1950	0.253	20.00	0.05
Laine de verre	20.0	0.041	12	0.233	0.20	4.88
Béton lourd	20.0	1.750	2300	0.256	8.75	0.11
Total					0.20	5.04

**Tableau 44 : Composition de la toiture-terrasse BBC**

Composition Simple	Plancher intermediaire BBC IC					
Composante	Ep	$\lambda$	MV	CS	U	R
Placoplatre BA 13	1.3	0.320	850	0.222	25.00	0.04
Hourdis de 12 en béton	12.0	1.090	1300	0.180	9.09	0.11
Polystyrène expansé	6.0	0.039	25	0.383	0.65	1.54
Béton lourd	5.0	1.750	2300	0.256	35.00	0.03
Carrelage	1.0	1.700	2300	0.194	170.00	0.01
Total					0.58	1.72

**Tableau 45 : Composition du plancher intermédiaire BBC**

Composition Simple	Plancher bas sur vide sanitaire BBC IC					
Composante	Ep	$\lambda$	MV	CS	U	R
PSE ED fond déc. à lang. 45 à 60mm - dc - h: 150mm - lt 2 - Entrax.2	25.0	0.145	800	0.278	0.58	1.73
Polystyrène expansé	6.0	0.039	25	0.383	0.65	1.54
Béton lourd	5.0	1.750	2300	0.256	35.00	0.03
Mortier	3.0	1.150	2000	0.233	38.33	0.03
Carrelage	2.0	1.700	2300	0.194	85.00	0.01
Total					0.30	3.33

**Tableau 46 : Composition du plancher bas sur vide sanitaire BBC**

Composition Simple	Murs ext BBC IC					
Composante	Ep	$\lambda$	MV	CS	U	R
Béton lourd	20.0	1.750	2300	0.256	8.75	0.11
Laine de verre	20.0	0.041	12	0.233	0.20	4.88
Placoplatre BA 13	1.3	0.320	850	0.222	25.00	0.04
Total					0.20	5.03

**Tableau 47 : Composition des murs extérieurs BBC**

#### V.4.f. Menuiseries et valorisation des apports solaires

- Portes :

Nom	Coeff U 1950 W/(m <sup>2</sup> .K)	Coeff U 1974 W/(m <sup>2</sup> .K)	Coeff U BBC W/(m <sup>2</sup> .K)
Porte ext bois	5.0	3.50	1.00

**Tableau 48 : Coefficients de transmission thermique des portes de 1950/1974/BBC**

- Fenêtres :

Nom	Ratio vitrage %	Facteur solaire vitrage (incidence 0°)	Coeff U partie vitrée (W/(m <sup>2</sup> .K))	Coeff U partie non vitrée (W/(m <sup>2</sup> .K))	Coeff U moyen (W/(m <sup>2</sup> .K))	Facteur Solaire moyen
fenêtre métal SV 1950	66	0.90	6.15	7.00	6.44	0.59
baie vitree 1974	66	0.90	4.95	2.40	4.08	0.59
fenetre bois SV 1974	66	0.90	4.95	2.40	4.08	0.59
baie vitree BBC	85	0.63	1.30	2.10	1.53	0.55
porte fenetre BBC	85	0.63	1.30	2.10	1.54	0.55
double vitrage argon BBC	85	0.63	1.30	2.10	1.70	0.55

**Tableau 49 : Coefficients de transmission thermique des fenêtres et facteur solaire de 1950/1974/BBC**

#### *Scénarios de coefficients d'albédos*

Nom	Jan	Fév	Mar s	Avr	Mai	Juin	Juil	Aout	Sep	Oct	Nov	Déc
Gazon	0.20	0.20	0.20	0.20	0.20	0.20	0.20	0.20	0.20	0.20	0.20	0.20

**Tableau 50 : Coefficients d'albédos**

#### *Etats de surface*

Nom	Emissivité	Absorptivité
Brique rouge	0.92	0.68
Calcaire clair	0.36	0.35
Plâtre blanc	0.91	0.07

**Tableau 51 : Etats de surface (émissivités et absorptivités)**

#### V.4.g. Surfaces des fenêtres des façades Nord et Sud

##### *Surfaces Fenêtres 1950*

Nous avons choisi une surface de vitrage (vitre + cadre) égale à environ 20% de la surface du plancher. On obtient 27 % par rapport à la surface de la façade au sud. Le programme « Règles de l'Art Grenelle de l'Environnement 2012 » quant à lui, évoque en moyenne sur le parc un pourcentage de vitrage de 20 à 25 % de la façade principale.

Orientation	Surface brute (Sb) m <sup>2</sup>	Surface plancher (Sp) m <sup>2</sup>	%sur surface plancher Sb/Sp	Surface mur (Sm) m <sup>2</sup>	%sur la surface mur Sb/Sm	Surface vitrée (Sv) m <sup>2</sup>	%sur la surface plancher Sv/Sp	%sur la surface mur Sv/Sm
Vertical sud	6,80	69,83	9,74	24,98	27,23	4,49	6,43	17,97
Vertical nord	6,65	69,83	9,52	24,98	26,63	4,39	6,29	17,57
<b>TOTAL</b>	<b>13,45</b>		<b>19,26</b>	<b>49,95</b>	<b>26,93</b>	<b>8,88</b>	<b>12,71</b>	<b>35,54</b>

**Tableau 52 : Surfaces des fenêtres par rapport aux surfaces de plancher et de façade 1950**

### *Surfaces Fenêtres 1974*

Même chose pour 1974, nous avons choisi une surface de vitrage (vitre + cadre) égale à environ 20% de la surface du plancher. On obtient 35 % par rapport à la surface de la façade au sud. Le programme « Règles de l'Art Grenelle de l'Environnement 2012 » quant à lui, énonce en moyenne sur le parc, un pourcentage de vitrage de 37 % de la façade principale.

Orientation	Surface brute (Sb) m <sup>2</sup>	Surface plancher (Sp) m <sup>2</sup>	%sur surface plancher Sb/Sp	Surface mur (Sm) m <sup>2</sup>	%sur la surface mur Sb/Sm	Surface vitrée (Sv) m <sup>2</sup>	%sur la surface plancher Sv/Sp	%sur la surface mur Sv/Sm
Vertical sud	8,80	69,83	12,60	24,98	35,24	5,81	8,32	23,26
Vertical nord	5,60	69,83	8,02	24,98	22,42	3,70	5,29	14,80
<b>TOTAL</b>	<b>14,40</b>		<b>20,62</b>	<b>49,95</b>	<b>28,83</b>	<b>9,50</b>	<b>13,61</b>	<b>38,05</b>

**Tableau 53 : Surfaces des fenêtres par rapport aux surfaces de plancher et de façade 1974**

### *Surfaces Fenêtres BBC*

Pour le BBC nous avons choisi une surface de vitrage (vitre + cadre) égale à 67% de la surface du mur orienté Sud et environ 30 % pour le côté Nord.

Orientation	Surface brute (Sb) m <sup>2</sup>	Surface plancher (Sp) m <sup>2</sup>	%sur surface plancher Sb/Sp	Surface mur (Sm) m <sup>2</sup>	%sur la surface mur Sb/Sm	Surface vitrée (Sv) m <sup>2</sup>	%sur la surface plancher Sv/Sp	%sur la surface mur Sv/Sm
Vertical sud	16,77	69,83	24,02	24,98	67,15	14,25	20,41	57,08
Vertical nord	7,46	69,83	10,68	24,98	29,87	6,34	9,08	25,39
<b>TOTAL</b>	<b>24,23</b>		<b>34,70</b>	<b>49,95</b>	<b>48,51</b>	<b>15,99</b>	<b>29,49</b>	<b>82,46</b>

**Tableau 54 : Surfaces des fenêtres par rapport aux surfaces de plancher et de façade BBC**

### *Surfaces Fenêtres 1950/1974/BBC en immeuble collectif*

En posant un pourcentage de surface vitrée de 20% par rapport à la surface du plancher, on obtient 33 % par rapport à la surface de la façade au sud et 22 % au Nord. Ces hypothèses concordent assez bien les résultats du programme « Règles de l'Art Grenelle de l'Environnement 2012 » qui évoque en moyenne sur le parc, un pourcentage de 33 % dans les années 1950 et 35% 1974. On prendra comme hypothèse la même configuration pour BBC.

Orientation °	Surface brute (Sb) m <sup>2</sup>	Surface plancher (Sp) m <sup>2</sup>	% sur surface plancher Sb/Sp	Surface mur (Sm) m <sup>2</sup>	% sur la surface mur Sb/Sm	Surface vitrée (Sv) m <sup>2</sup>	% sur la surface plancher Sv/Sp	% sur la surface mur Sv/Sm
Vertical sud	33,20	279,32	11,89	99,90	33,23	21,91	7,84	21,93
Vertical nord	22,60	279,32	8,09	99,90	22,62	14,92	5,34	14,93
<b>TOTAL</b>	<b>55,80</b>		<b>19,98</b>	<b>199,80</b>	<b>27,93</b>	<b>36,83</b>	<b>13,18</b>	<b>36,86</b>

**Tableau 55 : Surfaces des fenêtres par rapport aux surface de plancher et de façade  
1950/1974/BBC**

#### V.4.h. Ponts thermiques

##### ► Maison Individuelle

###### 1950

Dans une maison fortement isolée, la part des ponts thermiques dans les sources de déperdition peut s'avérer prépondérante. Mais ici la maison n'étant pas isolée, la part de ponts thermique est négligée. L'hypothèse retenue est donc aucuns ponts thermiques.

###### 1974

1974		
Type de liaisons	Psi (W/m.K)	Origine de la donnée
Mur ext avec plancher bas	0,79	catalogue THU
Mur ext avec plancher haut	0,13	catalogue THU
Liaisons menuiseries/murs ext	0,25	catalogue THU
Angle sortant	0,13	catalogue THU

**Tableau 56 : Ponts thermiques 1974**

###### BBC

BBC		
Type de liaisons	Psi (W/m.K)	Origine de la donnée
Mur ext avec plancher bas	0,23	catalogue THU
Mur ext avec plancher haut	0,25	catalogue THU
Liaisons menuiseries/murs ext	0,05	catalogue THU
Angle sortant	0,14	catalogue THU

**Tableau 57 : Ponts thermiques BBC**

► **Immeuble collectif :**

1974

1974		
Type de liaisons	Psi (W/m.K)	Origine de la donnée
Mur ext avec plancher bas	0,08	catalogue THU
Mur ext avec plancher haut	0,74	catalogue THU
Liaisons menuiseries/murs ext	0,25	catalogue THU
Angle sortant	0,14	catalogue THU

**Tableau 58 : Ponts thermiques 1974**

BBC

BBC		
Type de liaisons	Psi (W/m.K)	Origine de la donnée
Mur ext avec plancher bas	0,25	catalogue THU
Mur ext plancher intermédiaire	0,13	catalogue THU
Mur ext avec plancher haut	0,25	catalogue THU
Liaisons menuiseries/murs ext	0,05	catalogue THU
Angle sortant	0,14	catalogue THU

**Tableau 59 : Ponts thermiques BBC**

**V.4.i. Scénario d'occupation hebdomadaire :**

► **Maison individuelle**

Nous posons l'hypothèse qu'il n'y a que deux zones simulées (RDC et les combles) dans le but de simplifier l'étude.

Nous avons retenu un scénario d'occupation longue pour une famille standard de 4 personnes (un couple et deux enfants avec une présence permanente de 18h à 7h, une présence 1 heure le midi pour le couple et une présence permanente le week-end).

Scénario d'occupation

%	Lundi	Mardi	Mercredi	Jeudi	Vendredi	Samedi	Dimanche
0 H	100	100	100	100	100	100	100
1 H	100	100	100	100	100	100	100
2 H	100	100	100	100	100	100	100
3 H	100	100	100	100	100	100	100
4 H	100	100	100	100	100	100	100
5 H	100	100	100	100	100	100	100
6 H	100	100	100	100	100	100	100
7 H	100	100	100	100	100	100	100
8 H	0	0	0	0	0	0	100
9 H	0	0	0	0	0	0	100
10 H	0	0	0	0	0	0	100
11 H	0	0	0	0	0	0	100
12 H	0	0	0	0	0	0	100
13 H	50	50	50	50	50	50	100
14 H	0	0	0	0	0	0	100
15 H	0	0	0	0	0	0	100
16 H	0	0	0	0	0	0	100
17 H	0	0	0	0	0	0	100
18 H	0	0	0	0	0	0	100
19 H	100	100	100	100	100	100	100
20 H	100	100	100	100	100	100	100
21 H	100	100	100	100	100	100	100
22 H	100	100	100	100	100	100	100
23 H	100	100	100	100	100	100	100
24 H	100	100	100	100	100	100	100

**Figure 66 : Scénario d'occupation en maison individuelle exprimé en pourcentage du nombre de personnes (4 personnes)**

### ► Immeuble collectif

Dans le cas de l'immeuble collectif, on suppose qu'il y a quatre zones thermiques étudiées, le RDC et les trois étages. Nous supposons également qu'au rez-de – chaussée se trouve un commerce avec les scénarii qui lui correspondent.

Nous avons retenu le même scénario d'occupation que pour celui de la maison individuelle pour les étages. Pour le commerce, le scénario est différent, on considère une occupation de 10h à 20h du lundi au samedi.

%	Lundi	Mardi	Mercredi	Jeudi	Vendredi	Samedi	Dimanche
0 H	0	0	0	0	0	0	0
1 H	0	0	0	0	0	0	0
2 H	0	0	0	0	0	0	0
3 H	0	0	0	0	0	0	0
4 H	0	0	0	0	0	0	0
5 H	0	0	0	0	0	0	0
6 H	0	0	0	0	0	0	0
7 H	0	0	0	0	0	0	0
8 H	0	0	0	0	0	0	0
9 H	0	0	0	0	0	0	0
10 H	100	100	100	100	100	100	0
11 H	100	100	100	100	100	100	0
12 H	100	100	100	100	100	100	0
13 H	100	100	100	100	100	100	0
14 H	100	100	100	100	100	100	0
15 H	100	100	100	100	100	100	0
16 H	100	100	100	100	100	100	0
17 H	100	100	100	100	100	100	0
18 H	100	100	100	100	100	100	0
19 H	100	100	100	100	100	100	0
20 H	0	0	0	0	0	0	0
21 H	0	0	0	0	0	0	0
22 H	0	0	0	0	0	0	0
23 H	0	0	0	0	0	0	0
24 H	0	0	0	0	0	0	0

**Figure 67 : Scénario d'occupation du commerce exprimé en pourcentage du nombre de personnes (4 personnes)**

### V.4.j. Consignes de température hebdomadaire

Nous avons retenu pour l'étude, un scénario de température avec une consigne de température à 20°C constante pour la maison individuelle et les étages de l'immeuble.

°C	Lundi	Mardi	Mercredi	Jeudi	Vendredi	Samedi	Dimanche
0 H	20	20	20	20	20	20	20
1 H	20	20	20	20	20	20	20
2 H	20	20	20	20	20	20	20
3 H	20	20	20	20	20	20	20
4 H	20	20	20	20	20	20	20
5 H	20	20	20	20	20	20	20
6 H	20	20	20	20	20	20	20
7 H	20	20	20	20	20	20	20
8 H	20	20	20	20	20	20	20
9 H	20	20	20	20	20	20	20
10 H	20	20	20	20	20	20	20
11 H	20	20	20	20	20	20	20
12 H	20	20	20	20	20	20	20
13 H	20	20	20	20	20	20	20
14 H	20	20	20	20	20	20	20
15 H	20	20	20	20	20	20	20
16 H	20	20	20	20	20	20	20
17 H	20	20	20	20	20	20	20
18 H	20	20	20	20	20	20	20
19 H	20	20	20	20	20	20	20
20 H	20	20	20	20	20	20	20
21 H	20	20	20	20	20	20	20
22 H	20	20	20	20	20	20	20
23 H	20	20	20	20	20	20	20
24 H	20	20	20	20	20	20	20

**Figure 68 : Scénario de consigne de température constante 20°C**

Pour le commerce, ce scénario est différent. On suppose que l'on coupe le chauffage la nuit :

°C	Lundi	Mardi	Mercredi	Jeudi	Vendredi	Samedi	Dimanche
0 H	0	0	0	0	0	0	0
1 H	0	0	0	0	0	0	0
2 H	0	0	0	0	0	0	0
3 H	0	0	0	0	0	0	0
4 H	0	0	0	0	0	0	0
5 H	0	0	0	0	0	0	0
6 H	0	0	0	0	0	0	0
7 H	20	20	20	20	20	20	20
8 H	20	20	20	20	20	20	20
9 H	20	20	20	20	20	20	20
10 H	20	20	20	20	20	20	20
11 H	20	20	20	20	20	20	20
12 H	20	20	20	20	20	20	20
13 H	20	20	20	20	20	20	20
14 H	20	20	20	20	20	20	20
15 H	20	20	20	20	20	20	20
16 H	20	20	20	20	20	20	20
17 H	20	20	20	20	20	20	20
18 H	20	20	20	20	20	20	20
19 H	20	20	20	20	20	20	20
20 H	0	0	0	0	0	0	0
21 H	0	0	0	0	0	0	0
22 H	0	0	0	0	0	0	0
23 H	0	0	0	0	0	0	0
24 H	0	0	0	0	0	0	0

**Figure 69 : Scénario de consigne de température commerce**

**V.4.k. Scénario de renouvellement d'air**

► **Maison individuelle**

Composante	Ventilation mécanique (vol/h)	Infiltration (vol/h)	Total (vol/h)
1950	0.0	0.6	0.6
1974	0.3	0.3	0.6
BBC (double flux)	0.1	0.1	0.2

**Tableau 60 : Hypothèses de débit de ventilation pour la maison individuelle.**

1950 : Le scénario de base correspond à une ventilation naturelle par infiltrations soit un taux moyen de renouvellement d'air de 0,6 Vol/heure.

1974 : On prend une hypothèse de 0.3 vol/h comme ventilation mécanique et comme infiltration.

BBC : On prend une hypothèse d'une efficacité de 80 % pour l'échangeur de la ventilation double flux sur le débit de ventilation mécanique qui est de 0.5 vol/h. Ce qui nous donne :

$$Q_v = 0.5 \cdot (1 - 0.8) + 0.1 = 0.1 + 0.1 = 0.2 \text{ vol/h.}$$

► **Immeuble collectif RDC (commerce)**

Composante	Ventilation mécanique (vol/h)	Infiltration (vol/h)	Total (vol/h)
1950	0.0	1	1
1974	0.7	0.3	1
BBC (double flux)	0.2	0.1	0.3

**Tableau 61 : Hypothèses de débit de ventilation pour le commerce de l'immeuble collectif**

1950 : Le scénario de base correspond à une ventilation naturelle de 1 vol/h le jour et de 0.6 vol/h la nuit.

1974 : On prend une hypothèse une ventilation mécanique de 0.7 vol/h et des infiltrations de 0.3 vol/h soit 1 vol/h le jour et 0.3 vol/h la nuit

BBC : On prend une hypothèse d'une efficacité de 80 % pour l'échangeur de la ventilation double flux sur le débit de ventilation mécanique qui est de 1 vol/h. Ce qui nous donne :

$$Q_v = 1*(1-0.8)+0.1 = 0.2+0.1 = 0.3 \text{ vol/h.}$$

Tous ces débits ne sont valables que lorsque la ventilation mécanique est en marche, la nuit comme il n'y a pas d'occupation, la ventilation est arrêtée et on ne renseigne que les infiltrations dans le scénario de ventilation.

**V.4.1. Scénario de puissance dissipée hebdomadaire (W/m<sup>2</sup>)**

► **Maison individuelle**

W/m <sup>2</sup>	Lundi	Mardi	Mercredi	Jeudi	Vendredi	Samedi	Dimanche
0 H	1.14	1.14	1.14	1.14	1.14	1.14	1.14
1 H	1.14	1.14	1.14	1.14	1.14	1.14	1.14
2 H	1.14	1.14	1.14	1.14	1.14	1.14	1.14
3 H	1.14	1.14	1.14	1.14	1.14	1.14	1.14
4 H	1.14	1.14	1.14	1.14	1.14	1.14	1.14
5 H	1.14	1.14	1.14	1.14	1.14	1.14	1.14
6 H	5.70	5.70	5.70	5.70	5.70	5.70	5.70
7 H	5.70	5.70	5.70	5.70	5.70	5.70	5.70
8 H	1.14	1.14	1.14	1.14	1.14	5.70	5.70
9 H	1.14	1.14	1.14	1.14	1.14	5.70	5.70
10 H	1.14	1.14	1.14	1.14	1.14	5.70	5.70
11 H	1.14	1.14	1.14	1.14	1.14	5.70	5.70
12 H	7.00	7.00	7.00	7.00	7.00	7.00	7.00
13 H	7.00	7.00	7.00	7.00	7.00	7.00	7.00
14 H	1.14	1.14	1.14	1.14	1.14	5.70	5.70
15 H	1.14	1.14	1.14	1.14	1.14	5.70	5.70
16 H	1.14	1.14	1.14	1.14	1.14	5.70	5.70
17 H	1.14	1.14	1.14	1.14	1.14	5.70	5.70
18 H	5.70	5.70	5.70	5.70	5.70	5.70	5.70
19 H	7.00	7.00	7.00	7.00	7.00	7.00	7.00
20 H	7.00	7.00	7.00	7.00	7.00	7.00	7.00
21 H	5.70	5.70	5.70	5.70	5.70	5.70	5.70
22 H	1.14	1.14	1.14	1.14	1.14	1.14	1.14
23 H	1.14	1.14	1.14	1.14	1.14	1.14	1.14
24 H							

**Figure 70 : Scénario de puissance dissipée pour la maison individuelle**

### Scénario MI

Ce scénario de puissance dissipée issu des règles TH-BCE correspond à un scénario de puissance dissipée d'une maison individuelle pour environ 2024 kWh/an dissipés.

#### ► Immeuble collectif

W/m²	Lundi	Mardi	Mercredi	Jeudi	Vendredi	Samedi	Dimanche
0 H	0	0	0	0	0	0	0
1 H	0	0	0	0	0	0	0
2 H	0	0	0	0	0	0	0
3 H	0	0	0	0	0	0	0
4 H	0	0	0	0	0	0	0
5 H	0	0	0	0	0	0	0
6 H	0	0	0	0	0	0	0
7 H	0	0	0	0	0	0	0
8 H	0	0	0	0	0	0	0
9 H	0	0	0	0	0	0	0
10 H	14	14	14	14	14	14	0
11 H	14	14	14	14	14	14	0
12 H	14	14	14	14	14	14	0
13 H	14	14	14	14	14	14	0
14 H	14	14	14	14	14	14	0
15 H	14	14	14	14	14	14	0
16 H	14	14	14	14	14	14	0
17 H	14	14	14	14	14	14	0
18 H	14	14	14	14	14	14	0
19 H	14	14	14	14	14	14	0
20 H	0	0	0	0	0	0	0
21 H	0	0	0	0	0	0	0
22 H	0	0	0	0	0	0	0
23 H	0	0	0	0	0	0	0
24 H	0	0	0	0	0	0	0

**Figure 71 : Scénario de puissance dissipée pour le commerce de l'immeuble collectif**

*Scénario commerce* : Ce scénario de puissance dissipée adapté à un commerce est un scénario standard des règles Th-CE. Par extrapolation à toute l'année, on obtient une puissance dissipée de 3567 kWh/an. Pour le reste de l'immeuble, on utilise le même scénario que celui de la maison individuelle.

#### V.4.m. Scénario d'occultation

On choisit une occultation de 100 % l'été de 7h à 19h qui correspond à un scénario standard et une occultation le matin et le soir pour l'hiver.

%	Lundi	Mardi	Mercredi	Jeudi	Vendredi	Samedi	Dimanche
0 H	0	0	0	0	0	0	0
1 H	0	0	0	0	0	0	0
2 H	0	0	0	0	0	0	0
3 H	0	0	0	0	0	0	0
4 H	0	0	0	0	0	0	0
5 H	0	0	0	0	0	0	0
6 H	0	0	0	0	0	0	0
7 H	100	100	100	100	100	100	100
8 H	100	100	100	100	100	100	100
9 H	100	100	100	100	100	100	100
10 H	100	100	100	100	100	100	100
11 H	100	100	100	100	100	100	100
12 H	100	100	100	100	100	100	100
13 H	100	100	100	100	100	100	100
14 H	100	100	100	100	100	100	100
15 H	100	100	100	100	100	100	100
16 H	100	100	100	100	100	100	100
17 H	100	100	100	100	100	100	100
18 H	100	100	100	100	100	100	100
19 H	0	0	0	0	0	0	0
20 H	0	0	0	0	0	0	0
21 H	0	0	0	0	0	0	0
22 H	0	0	0	0	0	0	0
23 H	0	0	0	0	0	0	0
24 H	0	0	0	0	0	0	0

**Figure 72 : Scénario d'occultation estival**

%	Lundi	Mardi	Mercredi	Jeudi	Vendredi	Samedi	Dimanche
0 H	100	100	100	100	100	100	100
1 H	100	100	100	100	100	100	100
2 H	100	100	100	100	100	100	100
3 H	100	100	100	100	100	100	100
4 H	100	100	100	100	100	100	100
5 H	100	100	100	100	100	100	100
6 H	100	100	100	100	100	100	100
7 H	100	100	100	100	100	100	100
8 H	0	0	0	0	0	0	0
9 H	0	0	0	0	0	0	0
10 H	0	0	0	0	0	0	0
11 H	0	0	0	0	0	0	0
12 H	0	0	0	0	0	0	0
13 H	0	0	0	0	0	0	0
14 H	0	0	0	0	0	0	0
15 H	0	0	0	0	0	0	0
16 H	0	0	0	0	0	0	0
17 H	0	0	0	0	0	0	0
18 H	0	0	0	0	0	0	0
19 H	100	100	100	100	100	100	100
20 H	100	100	100	100	100	100	100
21 H	100	100	100	100	100	100	100
22 H	100	100	100	100	100	100	100
23 H	100	100	100	100	100	100	100
24 H	100	100	100	100	100	100	100

**Figure 73 : Scénario d'occultation hivernal**

1 scenario hiver toaster 1 Janvier au 7 Janvier	14 scenario hiver toaster 2 Avril au 8 Avril	27 scenario ete toaster 2 Juillet au 8 Juillet	40 scenario hiver toaster 1 Octobre au 7 Octobre
2 scenario hiver toaster 8 Janvier au 14 Janvier	15 scenario hiver toaster 9 Avril au 15 Avril	28 scenario ete toaster 9 Juillet au 15 Juillet	41 scenario hiver toaster 8 Octobre au 14 Octobre
3 scenario hiver toaster 15 Janvier au 21 Janvier	16 scenario hiver toaster 16 Avril au 22 Avril	29 scenario ete toaster 16 Juillet au 22 Juillet	42 scenario hiver toaster 15 Octobre au 21 Octobre
4 scenario hiver toaster 22 Janvier au 28 Janvier	17 scenario hiver toaster 23 Avril au 29 Avril	30 scenario ete toaster 23 Juillet au 29 Juillet	43 scenario hiver toaster 22 Octobre au 28 Octobre
5 scenario hiver toaster 29 Janvier au 4 Février	18 scenario hiver toaster 30 Avril au 6 Mai	31 scenario ete toaster 30 Juillet au 5 Aout	44 scenario hiver toaster 29 Octobre au 4 Novembre
6 scenario hiver toaster 5 Février au 11 Février	19 scenario hiver toaster 7 Mai au 13 Mai	32 scenario ete toaster 6 Aout au 12 Aout	45 scenario hiver toaster 5 Novembre au 11 Novembre
7 scenario hiver toaster 12 Février au 18 Février	20 scenario ete toaster 14 Mai au 20 Mai	33 scenario ete toaster 13 Aout au 19 Aout	46 scenario hiver toaster 12 Novembre au 18 Novembre
8 scenario hiver toaster 19 Février au 25 Février	21 scenario ete toaster 21 Mai au 27 Mai	34 scenario ete toaster 20 Aout au 26 Aout	47 scenario hiver toaster 19 Novembre au 25 Novembre
9 scenario hiver toaster 26 Février au 4 Mars	22 scenario ete toaster 28 Mai au 3 Juin	35 scenario ete toaster 27 Aout au 2 Septembre	48 scenario hiver toaster 26 Novembre au 2 Décembre
10 scenario hiver toaster 5 Mars au 11 Mars	23 scenario ete toaster 4 Juin au 10 Juin	36 scenario ete toaster 3 Septembre au 9 Septembre	49 scenario hiver toaster 3 Décembre au 9 Décembre
11 scenario hiver toaster 12 Mars au 18 Mars	24 scenario ete toaster 11 Juin au 17 Juin	37 scenario ete toaster 10 Septembre au 16 Septembr	50 scenario hiver toaster 10 Décembre au 16 Décembre
12 scenario hiver toaster 19 Mars au 25 Mars	25 scenario ete toaster 18 Juin au 24 Juin	38 scenario ete toaster 17 Septembre au 23 Septembr	51 scenario hiver toaster 17 Décembre au 23 Décembre
13 scenario hiver toaster 26 Mars au 1 Avril	26 scenario ete toaster 25 Juin au 1 Juillet	39 scenario hiver toaster 24 Septembre au 30 Septembr	52 scenario hiver toaster 24 Décembre au 30 Décembre

**Figure 74 : Scénario d’occultation annuel décomposé en deux scénarios hivernal et estival**

On considère un scénario estival de mai à septembre. La prise en compte de ce scénario est essentielle pour diminuer l’inconfort des températures estivales. On émet l’hypothèse que la façade Sud du Rez-de-chaussée (commerce) n’est pas occultée.

#### V.4.n. Visualisation 3D du bâtiment

##### ► Maison individuelle

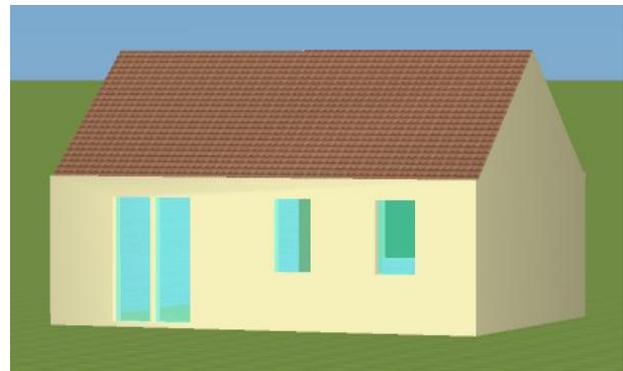
#### Façade Nord

1950



**Figure 75 : Vue de la façade Nord 1950**

#### Façade Sud



**Figure 76 : Vue de la façade Sud 1950**

1974



**Figure 77 : Vue de la façade Nord 1974**



**Figure 78 : Vue de la façade Sud 1974**

BBC



**Figure 79 : Vue de la façade Nord BBC**

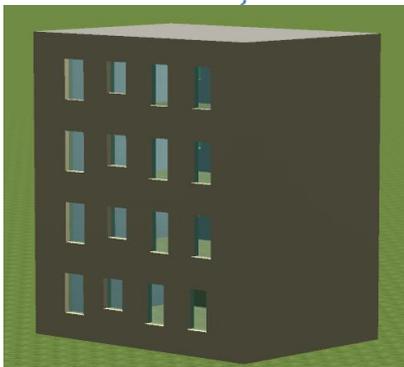


**Figure 80 : Vue de la façade Sud BBC**

► **Immeuble collectif (1950/1974/BBC)**

En dessinant le bâtiment sous Alcyone et en posant l'hypothèse d'une zone commerciale au RDC on obtient la géométrie suivante qui sera utilisée pour les trois périodes de construction 1950/1974/BBC.

*Façade Nord*



**Figure 81 : Vue de la façade Nord**

*Façade Sud*



**Figure 82 : Vue de la façade Sud**

En façade Sud, on émet l'hypothèse qu'il y a deux portes, une pour accéder au commerce et une autre pour accéder aux logements.

#### V.4.o. Méthodologie retenue, hypothèses de modélisation

Cette étude repose sur la simulation du comportement thermique dynamique du bâtiment au pas de temps 1/2 horaire sur une année de fonctionnement à l'aide du logiciel de simulation Pléiades Comfie Version 3.1.11.2.

#### V.4.p. Synthèse des résultats

Cette synthèse donne les besoins de l'année simulée zone par zone en kWh pour tout le bâtiment et par m<sup>2</sup>.

##### ► Maison individuelle

*Simulation de la semaine n°1 à la semaine n°52*

1950 :

Zone	Besoins				Puissance	
	Chauffage kWh	Chauffage kWh/m <sup>2</sup>	Climatisation kWh	Climatisation kWh/m <sup>2</sup>	Chauffage W	Climatisation W
RDC	19022	272	0	0	7845	0
R+1 - 2 - combles	0	0	0	0	0	0
<b>Total</b>	19022	272	0	0		

**Tableau 62 : Besoins et Puissances en chauffage et climatisation 1950**

Zone	Température		
	Minimum (°C)	Moyenne (°C)	Maximum (°C)
RDC	20.00	20.61	28.98
R+1 - 2 - combles	4.24	16.81	40.94

**Tableau 63 : Températures minimales, moyennes et maximales de l'année simulée**

1974 :

Zone	Besoins				Puissance	
	Chauffage kWh	Chauffage kWh/m <sup>2</sup>	Climatisation kWh	Climatisation kWh/m <sup>2</sup>	Chauffage W	Climatisation W
RDC	8463	121	0	0	4146	0
R+1 - 2 - combles	0	0	0	0	0	0
<b>Total</b>	8463	121	0	0		

**Tableau 64 : Besoins et Puissances en chauffage et climatisation 1974**

Zone	Température		
	Minimum (°C)	Moyenne (°C)	Maximum (°C)
RDC	20.00	20.72	27.11
R+1 - 2 - combles	-2.88	15.20	53.39

**Tableau 65 : Températures minimales, moyennes et maximales de l'année simulée**

BBC

Zone	Besoins				Puissance	
	Chauffage kWh	Chauffage kWh/m <sup>2</sup>	Climatisation kWh	Climatisation kWh/m <sup>2</sup>	Chauffage W	Climatisation W
RDC	1454	21	0	0	1714	0
R+1 - 2 - combles	0	0	0	0	0	0
<b>Total</b>	1454	21	0	0		

**Tableau 66 : Besoins et Puissances en chauffage et climatisation BBC**

Zone	Température		
	Minimum (°C)	Moyenne (°C)	Maximum (°C)
RDC	20.00	23.05	29.45
R+1 - 2 - combles	-4.26	15.33	57.83

**Tableau 67 : Températures minimales, moyennes et maximales de l'année simulée**

## ► Immeuble collectif

1950

Zone	Besoins				Puissance	
	Chauffage kWh	Chauffage kWh/m <sup>2</sup>	Climatisation kWh	Climatisation kWh/m <sup>2</sup>	Chauffage W	Climatisation W
RDC (commerce)	14001	201	0	0	15835	0
R+1 - 2 - R+1	14380	206	0	0	6418	0
R+2 - 3 - R+2	13213	189	0	0	5633	0
R+3 - 4 - R+3	18743	268	0	0	7798	0
<b>Total</b>	60337	216	0	0		

**Tableau 68 : Besoins et Puissances en chauffage et climatisation 1950**

Zone	Température		
	Minimum (°C)	Moyenne (°C)	Maximum (°C)
RDC (commerce)	7.80	18.72	28.31
R+1 - 2 - R+1	20.00	20.38	26.83
R+2 - 3 - R+2	20.00	20.38	26.75
R+3 - 4 - R+3	20.00	20.55	28.31

**Tableau 69 : Températures minimales, moyennes et maximales de l'année simulée**1974

Zone	Besoins				Puissance	
	Chauffage kWh	Chauffage kWh/m <sup>2</sup>	Climatisation kWh	Climatisation kWh/m <sup>2</sup>	Chauffage W	Climatisation W
RDC (commerce)	6838	98	0	0	9850	0
R+1 - 2 - R+1	7132	102	0	0	3902	0
R+2 - 3 - R+2	5807	83	0	0	3242	0
R+3 - 4 - R+3	9327	134	0	0	4490	0
<b>Total</b>	29105	104	0	0		

**Tableau 70 : Besoins et Puissances en chauffage et climatisation 1974**

Zone	Température		
	Minimum (°C)	Moyenne (°C)	Maximum (°C)
RDC (commerce)	11.79	19.78	28.99
R+1 - 2 - R+1	20.00	20.69	26.42
R+2 - 3 - R+2	20.00	20.63	26.22
R+3 - 4 - R+3	20.00	20.57	26.56

**Tableau 71 : Températures minimales, moyennes et maximales de l'année simulée***BBC*

Zone	Besoins				Puissance	
	Chauffage kWh	Chauffage kWh/m <sup>2</sup>	Climatisation kWh	Climatisation kWh/m <sup>2</sup>	Chauffage W	Climatisation W
RDC (commerce)	1267	18	0	0	5114	0
R+1 - 2 - R+1	689	10	0	0	1235	0
R+2 - 3 - R+2	635	9	0	0	1187	0
R+3 - 4 - R+3	1394	20	0	0	1599	0
Total	3984	14	0	0		

**Tableau 72 : Besoins et Puissances en chauffage et climatisation BBC**

Zone	Température		
	Minimum (°C)	Moyenne (°C)	Maximum (°C)
RDC (commerce)	16.17	23.43	33.98
R+1 - 2 - R+1	20.00	23.85	31.74
R+2 - 3 - R+2	20.00	23.65	31.16
R+3 - 4 - R+3	20.00	22.80	29.49

**Tableau 73 : Températures minimales, moyennes et maximales de l'année simulée****V.4.q. Récapitulatif des besoins**

Maison individuelle	Chauffage kWh	Chauffage kWh/m <sup>2</sup>
1950	19022	272
1974	8463	121
BBC	1454	21

**Tableau 74 : Récapitulatif des besoins maison individuelle**

Immeuble collectif	Chauffage kWh	Chauffage kWh/m <sup>2</sup>
1950	60337	216
1974	29105	104
BBC	3873	14

**Tableau 75 : Récapitulatif des besoins immeuble collectif**

#### V.4.a. Prise en compte des masques proches

Il s'agit maintenant de compléter celle présentée dans le premier rapport, par la prise en compte de l'orientation du bâtiment, du nombre d'occupants, des masques proches et de la mitoyenneté.

##### ► Scénarios étudiés

Ce sont les mêmes scénarios que précédemment auxquels viendra s'ajouter une rotation par pas de 15° de 0 à 180° dans le sens horaire. L'idée est de couvrir le plus de configurations possibles pour se rapprocher de la réalité.

##### ► Généralités

Les généralités sont les mêmes que sur site isolé. La géométrie du bâtiment et la composition de son enveloppe restent identiques. Ce qui change c'est la prise en compte des masques proches et dans le cas de l'immeuble collectif, on émet l'hypothèse que les murs Est-Ouest sont mitoyens à température identique. Nous présenterons en détail les besoins de chauffage pour une famille et nous donnerons un exemple de cas pour les besoins d'un seul occupant.

##### ► Visualisation 3D du bâtiment

*Maison individuelle*

On dessine un quartier constitué de 9 maisons dont 8 sont des masques proches espacés de 9 m aussi bien verticalement qu'horizontalement.



**Figure 83 : Vue de la configuration masque pour la maison individuelle**

*Immeuble collectif (1950/1974/BBC)*

On émet l'hypothèse que les immeubles collectifs sont mitoyens et espacés de la hauteur de l'immeuble. La hauteur de l'immeuble est dans les trois cas de 10 mètres.

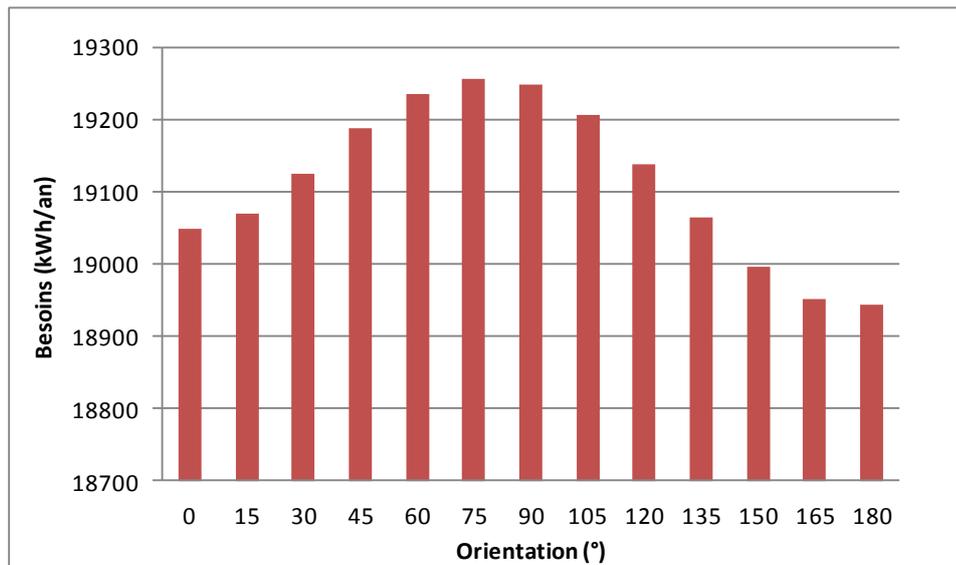


**Figure 84 : Vue de la configuration masque pour l'immeuble collectif**

### ► Synthèse des résultats

Cette synthèse donne les besoins de l'année simulée zone par zone en kWh pour tout le bâtiment.

*Maison individuelle en site isolé, besoins 1950*

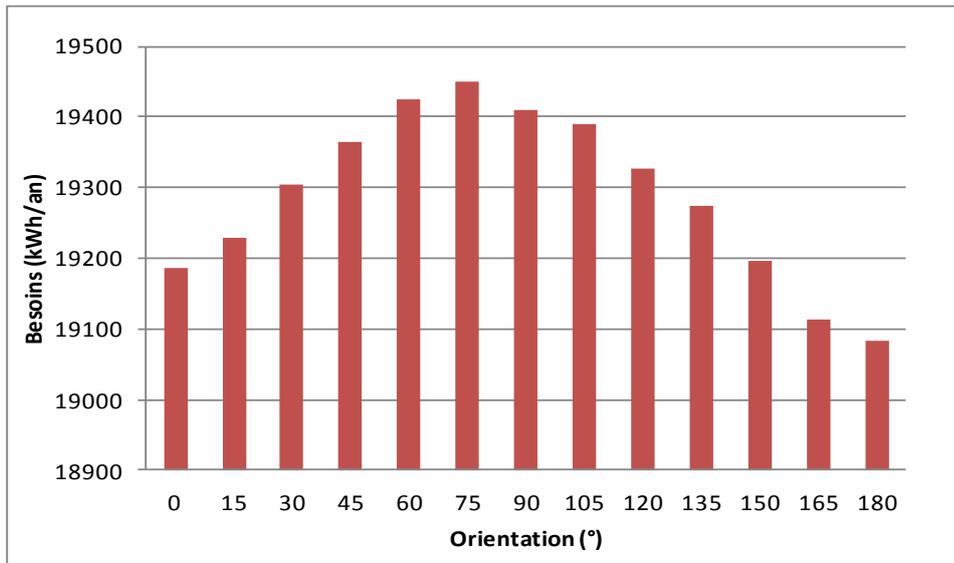


**Figure 85 : Evolution des besoins 1950 pour la maison en site isolé**

Dans le cas présenté ci-dessus qui est celui de la maison 1950, on remarque qu'on a moins de besoins lorsque la façade Nord de la maison est orientée au Sud. Cela peut paraître étonnant étant donné qu'il y a quasiment autant de fenêtres au Sud qu'au Nord. Cette différence vient de la porte située au Nord qui possède un facteur solaire non nul. Ce facteur solaire comprend le rayonnement qui passe directement à travers (ici au travers des interstices) mais également l'énergie absorbée et réémise à l'intérieur de la pièce. Les besoins maximaux sont pour l'orientation 75°-90° lorsque les gains solaires sont les plus faibles. Ici étant donné le faible écart entre le maximum (75°) et le minimum (180°), on peut admettre que les besoins sont les mêmes à 2% près.

*Maison individuelle avec masques, besoins 1950*

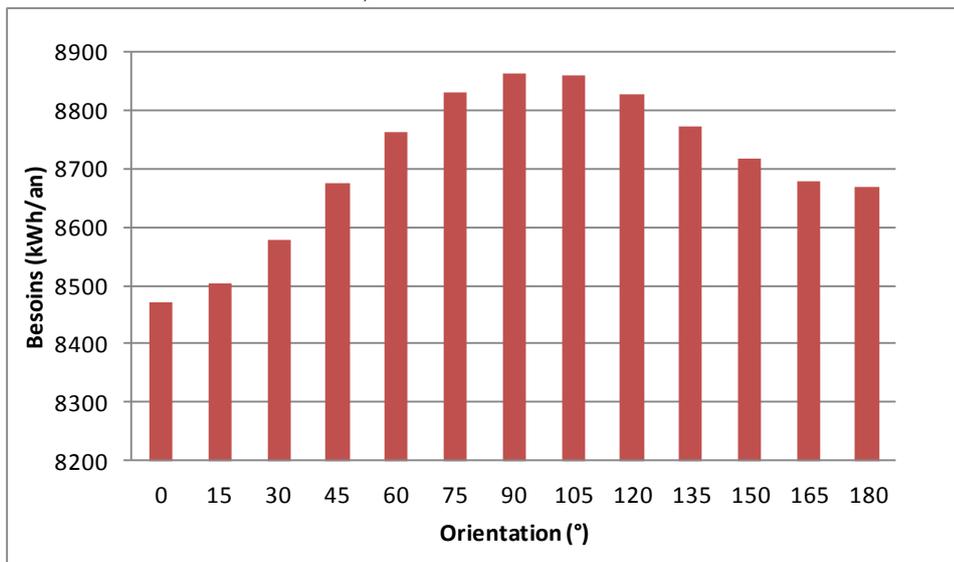
Dans ce cas de configuration, on simule l'orientation avec les masques (Figure 86). Ces masques sont espacés de 9 m et ont une hauteur égale à celle de la maison (**Erreur ! Source du renvoi introuvable.**). Cet aspect est étudié car il est l'image de la configuration périurbaine avec des maisons individuelles proches les unes des autres. On souhaite ainsi couvrir le plus de possibilités pour se rapprocher de la réalité et obtenir des gains solaires qui collent mieux à l'existant.



**Figure 86 : Evolution des besoins 1950 pour la maison avec masques**

Si on compare les besoins avec masques et sans masques, on observe pour le cas de la maison qu'ils ont un impact relativement faible. En effet ils augmentent les besoins d'à peine 1%. Les maisons étant suffisamment espacées et suffisamment basses, les masques sont négligeables.

*Maison individuelle en site isolé, besoins 1974*

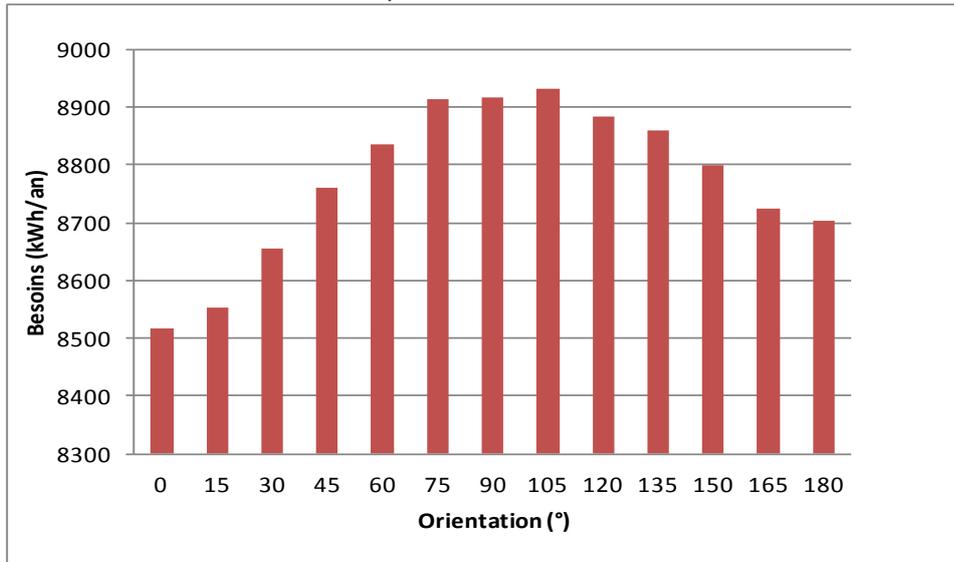


**Figure 87 : Evolution des besoins 1974 pour la maison en site isolé**

En 1974, on a cette fois plus de surface de menuiseries au sud qu'au Nord (8,8 m<sup>2</sup> contre 7,8 m<sup>2</sup>).

On trouve bien des besoins minimaux pour l'orientation 0° plein Sud. Dans la configuration avec masques on constate également un faible écart.

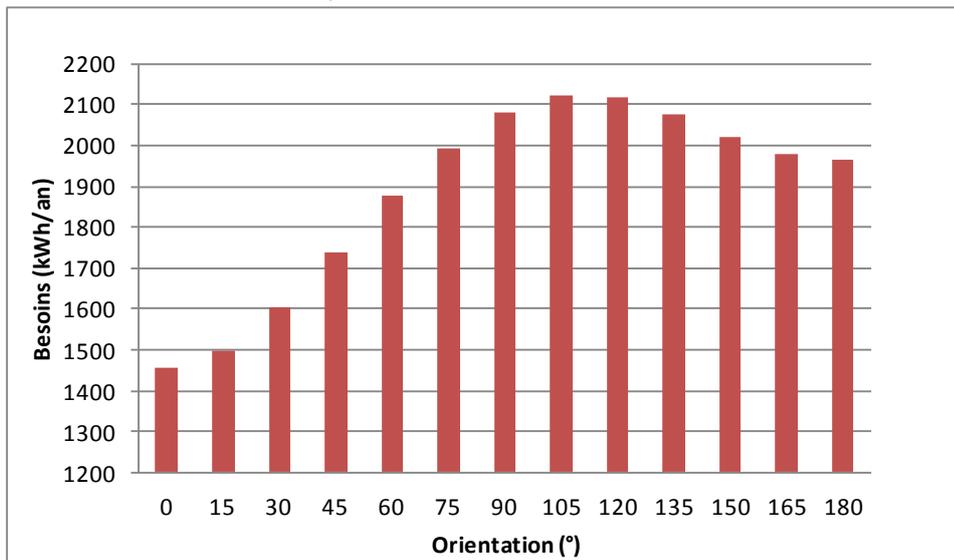
*Maison individuelle site avec masques, besoins 1974*



**Figure 88 : Evolution des besoins 1974 pour la maison avec masques**

Même remarque que pour le premier cas, les masques ne jouent pas un grand rôle et n'affectent que de 1 % les besoins de la maison.

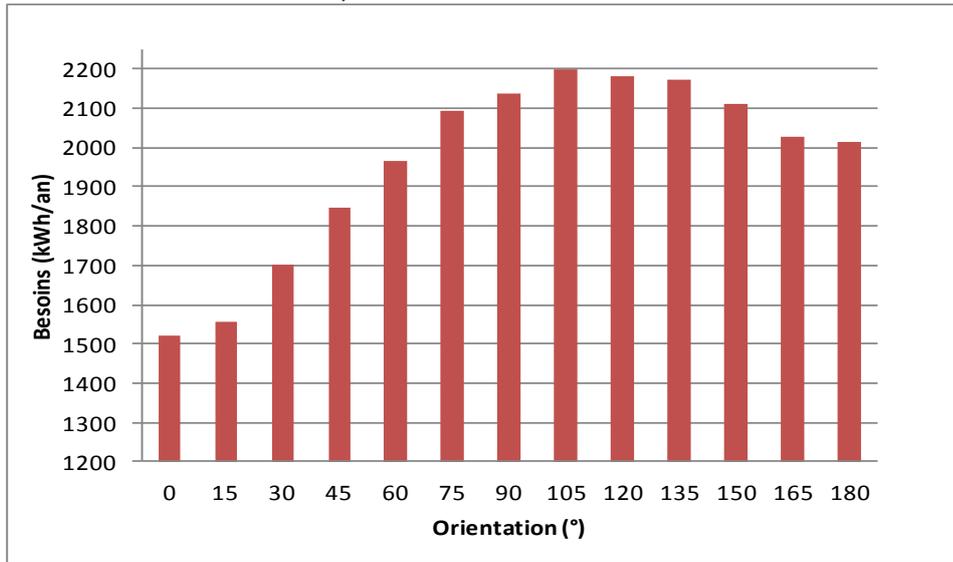
*Maison individuelle site isolé, besoins BBC*



**Figure 89 : Evolution des besoins BBC pour la maison en site isolé**

On peut constater en BBC un écart entre le minimum et le maximum de 30%. L'orientation joue donc un rôle important pour les bâtiments à faibles besoins. Ceux-ci ayant moins de besoins brut (7032 kWh), la part des gains solaires (4096 kWh) devient plus importante.

*Maison individuelle avec masques, besoins BBC*



**Figure 90 : Evolution des besoins BBC pour la maison avec masques**

En BBC, les masques sont un peu plus influents et peuvent augmenter les besoins de 3 à 6% ce qui reste relativement faible.

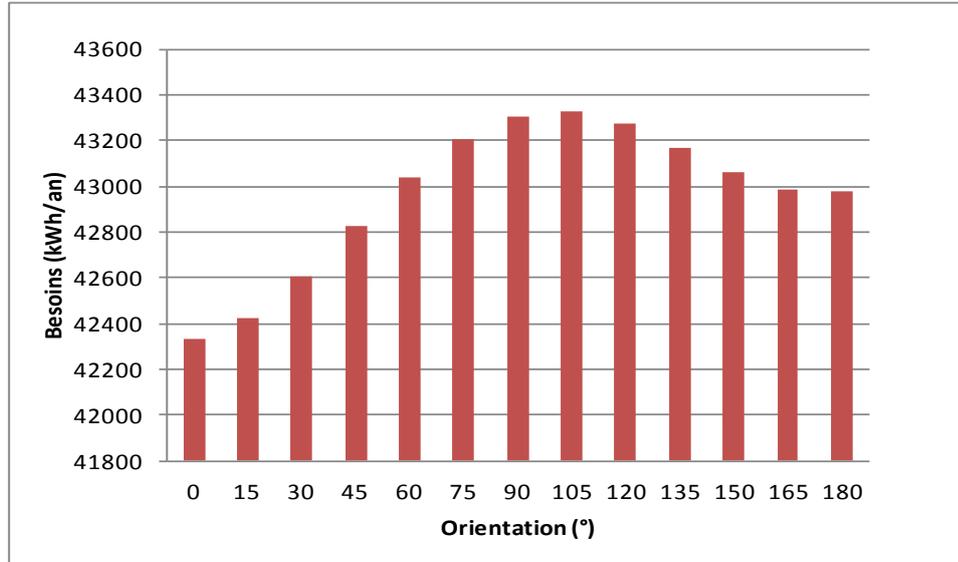
*Synthèse des configurations avant 1950/1974/BBC*

On peut également comparer les trois cas (1950/1974/BBC). En site isolé, on a respectivement 1,6% (312 kWh), 4,4% (393 kWh) et 31% (668kWh) d'écart entre les extremums pour les cas 1950,1974 et BBC. En site avec masques, on a les mêmes proportions 1,8% (366kWh), 4,6% (415kWh) et 31% (682kWh). On en déduit que plus le niveau d'isolation est grand, plus l'effet de l'orientation et donc l'apport ou la perte de gains solaires se fait ressentir dans les besoins.

► **Immeuble collectif (IC)**

Pour l'immeuble collectif, quatre zones sont simulées, le RDC et les trois étages. Ici on ne s'intéressera qu'aux résultats des étages. On considère que les immeubles collectifs sont mitoyens et ont donc des parois adiabatiques (aucuns échanges thermiques) puisqu'il n'y a pas de gradient de température.

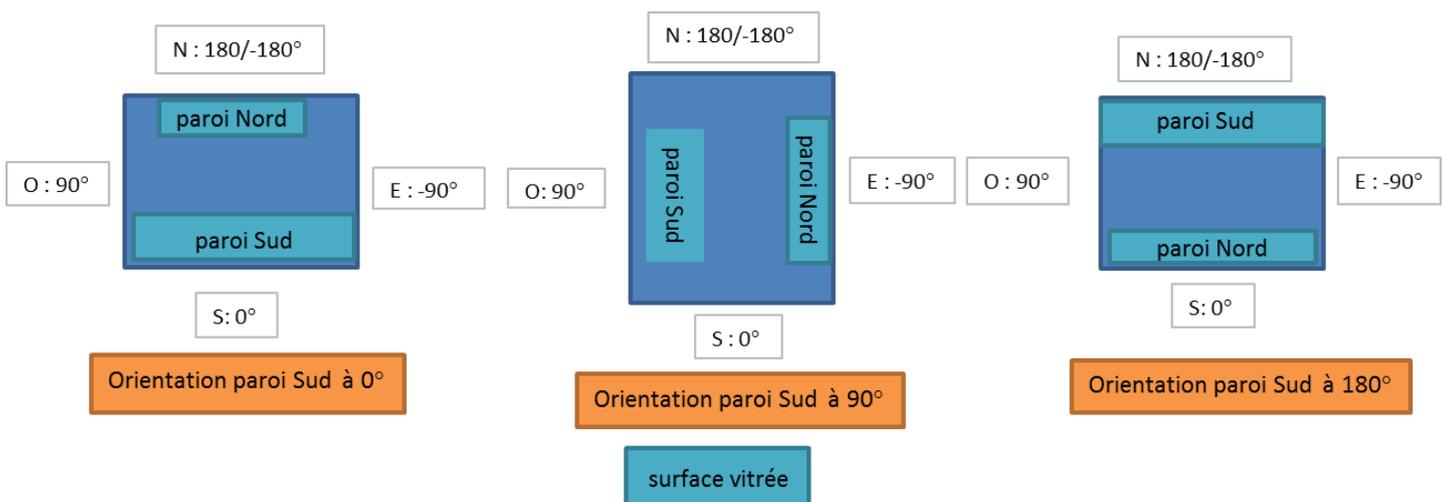
Besoins 1950 en site isolé



**Figure 91 : Evolution des besoins 1950 pour l'immeuble collectif en site isolé**

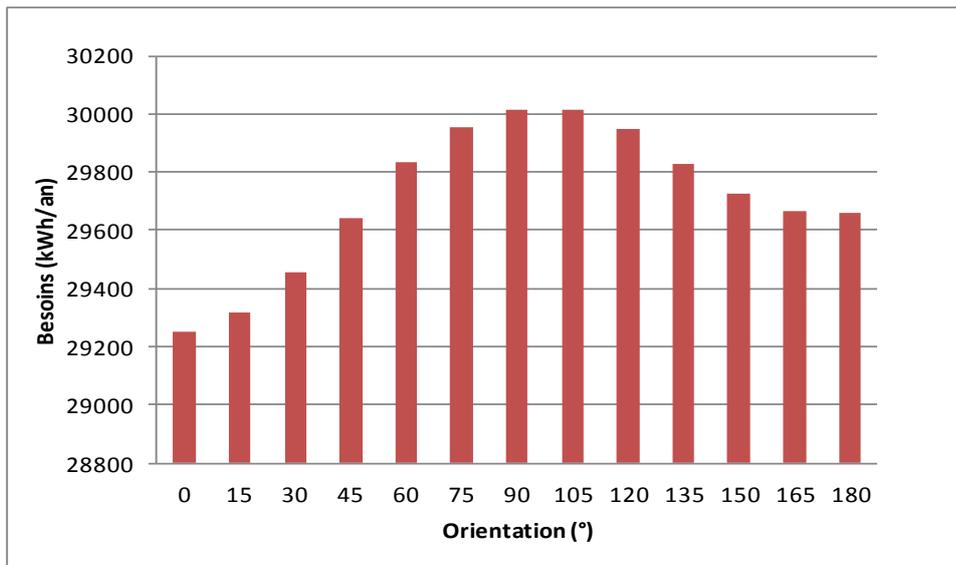
On peut séparer ce graphique en deux, une première partie de 0 à 90° où l'évolution des besoins est plus grande que dans la deuxième partie de 90 à 180°. En effet si on regarde le **Erreur ! Source du renvoi introuvable.** ci-dessous, on remarque que dans la première partie c'est la paroi où il y a le plus de vitrage qui est au sud alors que dans la deuxième partie elle est au Nord. Or plus la surface de vitrage est grande plus la variation de gains solaires est potentiellement importante. On en déduit aussi une plus grande sensibilité aux gains solaires de l'est à l'ouest en passant par le sud (azimut -90° à +90°) puisque c'est là où l'on reçoit le plus d'ensoleillement.

Même chose ici, on a moins de besoins à 0° car il y a plus de menuiseries au Sud qu'au Nord (33 m<sup>2</sup> contre 22 m<sup>2</sup>).



**Figure 92 : Orientation dans le sens horaire de 0° à 180 °**

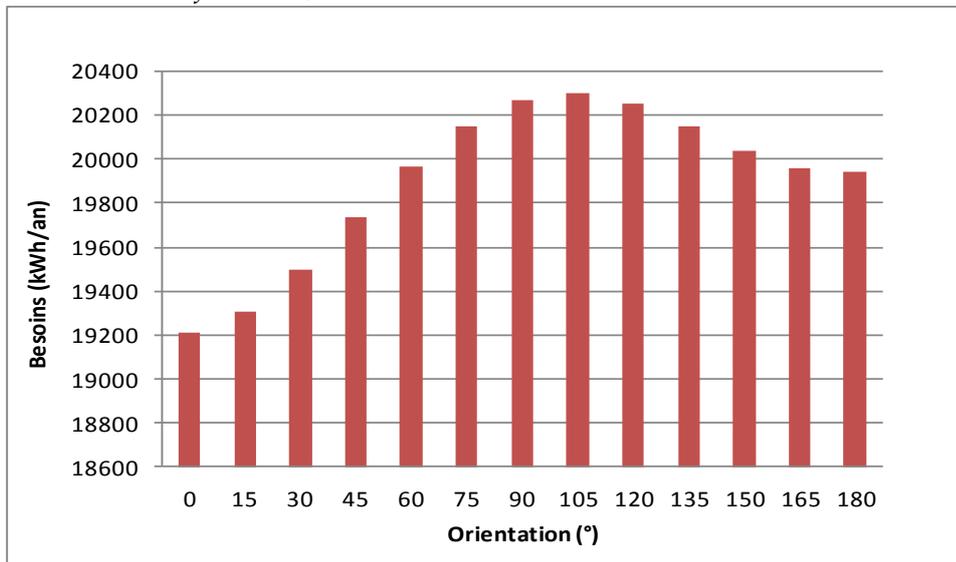
*Immeuble collectif avec masques, besoins 1950*



**Figure 93 : Evolution des besoins 1950 pour l'immeuble collectif avec masques**

On observe cette fois une diminution des besoins de l'ordre de 27% quand on passe du cas site isolé au cas avec masques. Cette diminution est due à l'effet de la mitoyenneté. On peut noter que l'évolution des besoins en fonction de l'orientation est similaire à celle du cas site isolé et conclure sur le fait que l'effet de la mitoyenneté est plus important que l'effet des masques.

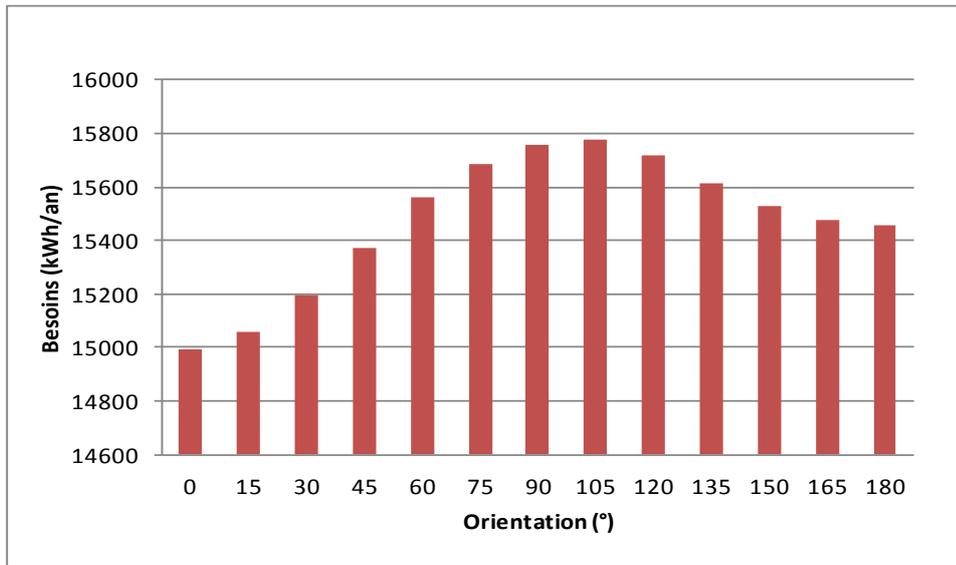
*Immeuble collectif site isolé, besoins 1974*



**Figure 94 : Evolution des besoins 1974 pour l'immeuble collectif en site isolé**

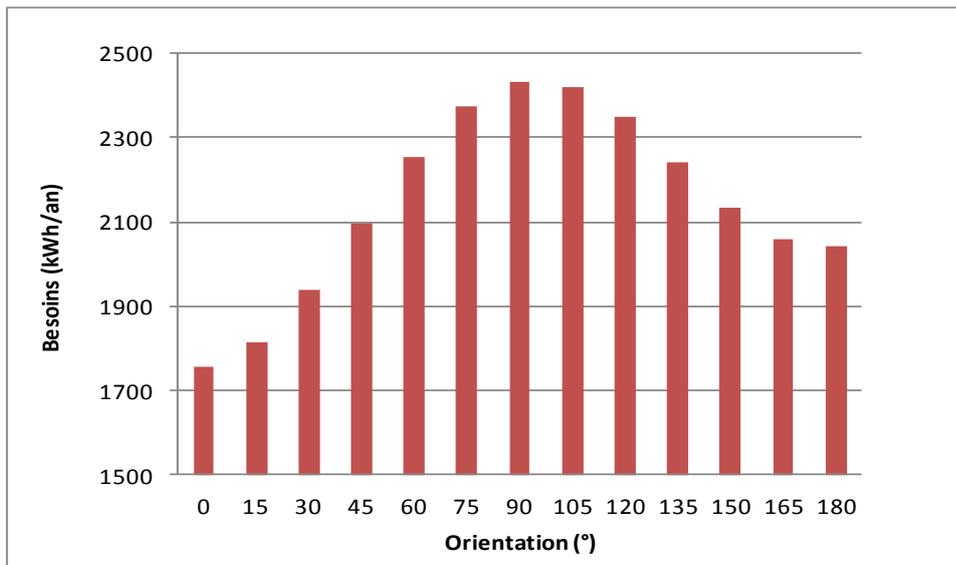
Les observations décrites plus haut s'appliquent aussi dans le cas 1974 ainsi qu'en BBC.

*Immeuble collectif avec masques, besoins 1974*



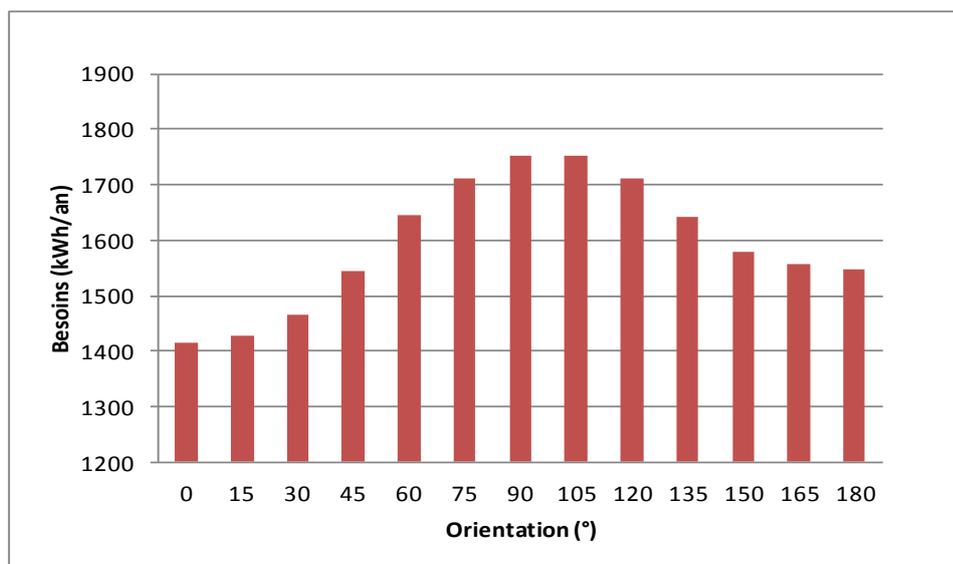
**Figure 95 : Evolution des besoins 1974 pour l'immeuble collectif avec masques**

*Immeuble collectif site isolé, besoins BBC*



**Figure 96 : Evolution des besoins BBC pour l'immeuble collectif en site isolé**

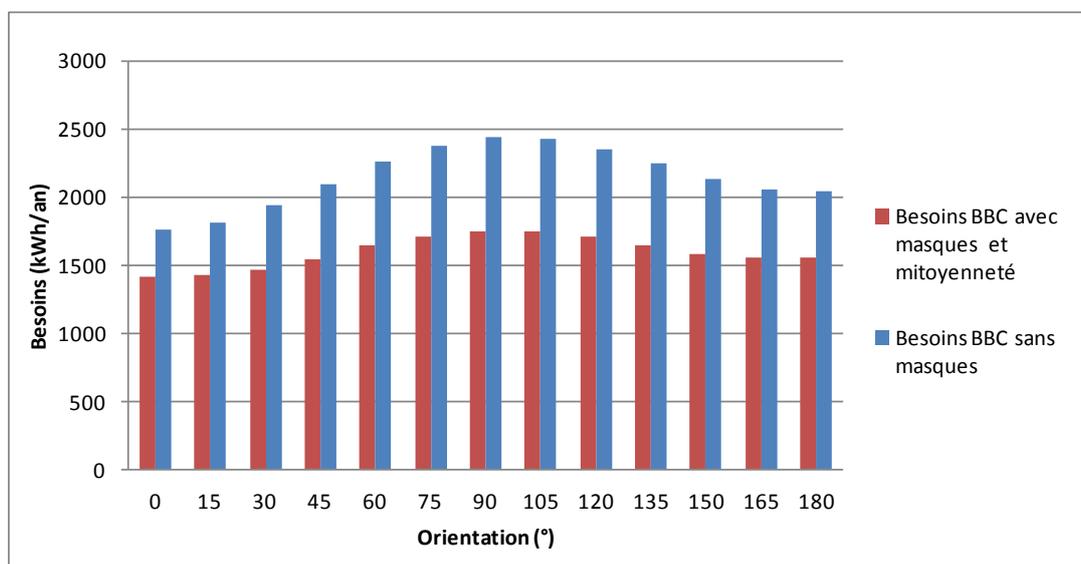
*Immeuble collectif avec masques, besoins BBC*



**Figure 97 : Evolution des besoins BBC pour l'immeuble collectif avec masques**

► **Comparaison des besoins de chauffage**

*Besoins BBC avec et sans masques (IC)*



**Figure 98 : Comparaisons des besoins BBC avec et sans masques pour l'immeuble collectif**

On peut également comparer l'effet du masque et l'effet de la mitoyenneté. On remarque ici que l'effet de la mitoyenneté est plus grand que l'effet du masque puisque les besoins sont plus faibles dans le cas avec mitoyenneté et masques que dans le cas site isolé.

*Comparaison des besoins BBC avec 4 occupants et 1 seul occupant*

On cherche ici à comparer l'influence du nombre d'occupants dans les besoins. On étudie 2 scénarios, un scénario où il y a une famille standard (4 occupants) et un scénario dit «célibataire» avec 1 seul occupant. Dans l'immeuble, au niveau du commerce, on prendra comme hypothèse une occupation de 4 personnes quel que soit le scénario célibataire ou famille qui s'applique dans les logements des étages.

Chaleur métabolique (kWh/an)	1 occupant	4 occupants
Maison	457	1791
Immeuble	2370	6371

**Tableau 76 : Comparaison des chaleurs métabolique**

Besoins site isolé (kWh/an)	1 occupant	4 occupants
BBC Maison	1984	1454
BBC Immeuble	3032	1759

**Tableau 77 : Comparaison des besoins 1 ou 4 occupants en site isolé**

Besoins site avec masques (kWh/an)	1 occupant	4 occupants
BBC Maison	2062	1519
BBC Immeuble	2662	1414

**Tableau 78 : Comparaison des besoins 1 ou 4 occupants en site avec masques**

On peut remarquer que les besoins en BBC augmentent d'environ 25 % pour la maison et de 42% pour l'immeuble. On en déduit donc que la chaleur métabolique dégagée par les occupants représente des apports internes non négligeables. Et plus les besoins sont faibles, plus la partie des gains par chaleur métabolique est prépondérante, c'est le cas du site avec masques de l'immeuble collectif. Dans la réalité, il faudrait faire une étude plus approfondie de la diminution d'utilisation de l'électroménager, des appareils domestiques qui ici n'a pas été prise en compte.

## V.5. Bibliographie

---

- EUR22040-European technology platform smart grids : vision and strategy for Europe's electricity networks of the future. Publication of European Commission, isbn : 92-79-01414-5; 2006.
- Hamilton BA. Understanding the benefits of the smart grid : smart grid implementation strategy. Report for the United States Department of Energy's, National Energy Technology Laboratory; 2010.
- Brown MA Zhou S., Smart-grid policies : an international review. Wiley Interdiscip Rev : Energy Environ 2013; 2(2) : 121–39.
- Technology Road map : Smart Grids. Report by International Energy Agency (IEA); April 2011.
- Gungor V, Sahin D, Kocak T, Ergut S, Buccella C, Cecati C, et al., A survey on smart grid potential applications and communication requirements. IEEE Trans Ind Inf 2012; 9 (1) : 28–42.
- Abtahi H A. Smart grid applications in the US: technical potential and regulatory barriers. Jordan J Mech Ind Eng 2010 ; 4 (1) : 9–14.
- Fan Z, Kulkarni P, Gormus S, Efthymiou C, Kalogridis G, Sooriyabandara M, et al., Smart grid communications: overview of research challenges, solutions, and standardization activities. Commun Surv Tutor IEEE 2013; 15 (1) : 21–38.
- Wang W, Xu Y, Khanna M., A survey on the communication architectures in smart grid. Comput Netw 2011; 55 (15) : 3604–29.
- Dedrick, J,ZhengY., Smart grid adoption : a strategic institutional perspective. Annual Conference, Industry Studies Association, Pittsburgh, PA; 2011.
- Estimating the costs and benefits of the smart grid : a preliminary estimate of the investment requirements and the resultant benefits of a fully functioning smart grid. Technical Report of EPRI, Palo Alto, CA,2011.
- Friedman H, Sreedharan P., Wiring the smart grid for energy savings: mechanisms and policy considerations. ACEEE Summer Study Energy Eff Build 2010.
- Hammons TJ., Integrating renewable energy sources into European grids. Int J Electric Power Energy Syst 2008; 30(8):462–75.
- Bouckaert S., Contribution des Smart Grids à la transition énergétique : évaluation dans des scénarios long terme, Ecole Nationale Supérieure des Mines de Paris (19/12/2013), Nadia Maïzi (Dir.)
- Zio E., Sansavini G., Vulnerability of Smart Grids with Variable Generation and Consumption: a System of Systems Perspective, IEEE Transactions on Systems, Man and Cybernetics, Part A: Systems and Humans 43, 3 (2013) 477-487
- Bergaentzlé C., Clastres C., Tarifications dynamiques et efficacité énergétique : l'apport des Smart Grids, Economies et Sociétés XLVII, N° 2, Série Energie n° 12 (2013) 348-363.
- Roche R., Idoumghar L., Blunier B., Miraoui A., Algorithmes hybrides pour la gestion intelligente de l'énergie dans les smart grids, Journées Francophones sur la planification, la décision et l'apprentissage pour le contrôle des systèmes - JFPDA 2012, France (2012).
- Clastres C., Smart grids : Another step towards competition, energy security and climate change objectives, Energy Policy 39, 9 (2011) 5399-5408.